

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique



Université de Tlemcen

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique et Electronique



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Commande de machines

Par : KEFIF SOHAIB

BARSALI OUSSAMA

THÈME

Réalisation de la motorisation d'un véhicule
électrique

Soutenance prévue, le **30/06/2019**, dans le jury composé de :

M. Abdelkader MECHERNENE	Maître de Conférences	Univ. Tlemcen	Président
M. Abdelmadjid BOUMEDIENE	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
M. Lotfi BAGHLI	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadreur

Année Universitaire : 2018/2019

قال الله ﷻ في القرآن الكريم:

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

أَقْرَأْ بِاسْمِ رَبِّكَ الَّذِي خَلَقَ ﴿١﴾ خَلَقَ الْإِنْسَانَ مِنْ عَلَقٍ ﴿٢﴾

أَقْرَأْ وَرَبُّكَ الْأَكْرَمُ ﴿٣﴾ الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ ﴿٤﴾ عَلَّمَ الْإِنْسَانَ

مَا لَمْ يَعْلَمْ ﴿٥﴾

صَبَّحَهُ بِالنَّوْءِ الْعَظِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce travail :

- À mes parents : Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie le bon dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.
- À mes chers frères Abdellah et Mohamed Hicham, mes soeurs Asma et Amina, à tous les membres de ma grande famille Kefif et Nedjari.
- À tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en commandes électriques.
- À toutes mes amis, et à la promotion master 2 electrotechnique, option commandes électriques : session 2019.
- Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et m'ont soutenu.

SOHAIB KEFIF
Tlemcen, le 16 juin 2019

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont beaucoup veillée sur moi et mes études. je tiens à les remercier pour leur amour inconditionnel, leur conseils précieux et leur présence dans ma vie. À mon frère Zakaria et ma soeur Souhila qui étaient là pour moi.

À tous les membres de ma grande famille, sans oublié les petits Kawtar et Marouan
à tous mes amis et à toutes les équipes dont j'ai fait partie Forspex, EcoDar, Nigma et Gamestore.

Enfin, je dédie ce mémoire à tous mes professeurs qui m'ont aidé durant tout mon cursus universitaire et à mes camarades de promotion et à tous ceux qui ont contribué a la réalisation de ce travail.

OUSSAMA BARSALI
Tlemcen, le 16 juin 2019

Remerciements

A vant tout, nous remercions **ALLAH** le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui que ce travail a pu être réalisée.

C'est un agréable plaisir pour nous d'exprimer nos remerciements à notre encadreur monsieur Lotfi BAGHLI professeur à l'Université de tlemcen, pour son soutien, ses conseils et aussi pour avoir mis à notre disposition tout le matériel nécessaire au bon déroulement de notre projet.

Nous sommes honorés par la présence de monsieur Abdelkader MECHERNENE, maitre de conférence à l'Université de tlemcen qui a bien voulu accepter d'assurer la responsabilité de président de jury. Je le remercie également pour tous ses conseils durant les séances de cours.

Nous remercions vivement Monsieur Abdelmajid BOUMEDIENE, professeur à l'Université de tlemcen, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre profond respect.

Sohaib KEFIF, Ooussama BARSALI
Tlemcen, le 16 juin 2019

Table des matières

Table des figures	11
1 Généralités sur les Véhicules Electriques	18
I) Introduction	18
II) Historique [9]	19
III) Actualités des Véhicules Electriques	20
IV) Définition d'un Véhicule Electrique	20
V) Description générale de la chaîne de traction	21
V.1) Le Moteur Electrique d'Entrainement (MSAP, MSAB, MCC, MAS...)	21
V.2) Convertisseur statique	22
V.3) Batterie	22
VI) Différentes configurations de véhicule électrique	23
VI.1) Véhicule électrique monomoteur	24
VI.2) Véhicule électrique multimoteurs	24
VII) Structure du véhicule électrique	25
VII.1) Critères de choix des roues motrices	26
VII.2) Critères de choix des roues libres	27
VII.3) Choix des actionneurs	27
VIII) Modélisation dynamique du véhicule	27
VIII.1) Contraintes dynamiques sur le véhicule	27
VIII.1.1) Contraintes d'accélération 'accélération et freinage' :	28
VIII.1.2) Contrainte de vitesse maximale :	28
VIII.1.3) Contrainte de non-glissement :	28
VIII.1.4) Force d'entraînement :	29
VIII.2) Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale	29
VIII.3) Couples résistant au déplacement	30
VIII.4) Roulement uniforme sur sol plat	30
VIII.5) Franchissement de pente	30
VIII.6) Franchissement d'obstacles	31
VIII.7) Franchissement de pente	31
VIII.8) Franchissement d'obstacles	32
VIII.9) Accélération	33

IX)	Conclusion	33
2	Etat de l'art du véhicule électrique et choix du convertisseur de puissance	35
I)	Introduction	36
II)	But du projet	36
III)	Aperçu général des véhicules concernée	36
III.1)	Avant-propos	36
III.2)	Technologie des batteries	36
III.2.1)	Les différents types de batteries	36
III.2.1.α)	Batteries au plomb	36
III.2.1.β)	Batteries au nickel	37
III.2.1.γ)	Batteries au Lithium :	37
III.3)	Technologie du moteur	38
III.3.1)	Type des moteurs	38
III.3.2)	Moteur à courant continu	39
III.3.3)	Moteur asynchrone	39
III.3.4)	Moteur synchrone à aimant permanent	41
III.3.5)	Moteur brushless	41
III.3.6)	Choix du moteur	41
IV)	Conclusion	42
3	Machine synchrone à aimants permanents (<i>MSAP</i>)	44
I)	Introduction	45
II)	Présentation de la machine synchrone à aimants permanents	46
II.1)	Structure	46
II.2)	Aimants permanents	47
II.3)	Types de rotor d'une <i>MSAP</i>	49
III)	Couple des machines synchrones à aimants permanents	49
IV)	Avantages et Inconvénients des <i>MSAP</i>	50
IV.1)	Avantages des <i>MSAP</i>	50
IV.2)	Inconvénients des <i>MSAP</i>	50
V)	Comparaison entre la <i>MSAP</i> et les autres machines électriques	50
VI)	Domaines d'application des moteurs synchrones	51
VII)	Conclusion	52
4	Modélisation et commande vectorielle de la <i>MSAP</i>	54
I)	Introduction	55
II)	Hypothèses simplificatrices	55
III)	Modélisation de la <i>MSAP</i>	55
III.1)	Mise en équation de la <i>MSAP</i> en triphasé (modèle en abc)	55
III.1.1)	a) Equations électriques	55
III.1.2)	b) Equation électromagnétique	57

III.1.3)	c) Equation mécanique	57
III.2)	Mise en équation de la MSAP en diphasé (modèle vectoriel)	58
III.2.1)	Principe de la transformation de park	58
III.2.2)	a) Passage direct : du triphasé au diphasé	59
III.2.3)	b) Passage inverse : du diphasé au triphasé	59
III.2.4)	Principe de la transformation de concordia	59
III.2.5)	a) Passage direct : du triphasé au diphasé	60
III.2.6)	b) Passage inverse : du diphasé au triphasé	60
III.2.7)	Passage du repère (d, q) au repère (α, β)	61
III.3)	Modélisation de la MSAP dans le repère de park	61
III.3.1)	a) Equation électrique	61
III.3.2)	b) Equations électromagnétique	61
III.3.3)	c) Equations mécaniques	61
III.4)	Mise sous forme équation d'état	62
IV)	Modélisation du convertisseur DC-AC	62
IV.1)	Définition de l'onduleur de tension	63
IV.2)	Onduleur de tension triphasé	63
IV.3)	Modélisation de l'onduleur de tension triphasé	63
IV.4)	stratégie de commandes pour les onduleurs	64
IV.4.1)	a) Principe de la commande MLI	64
IV.4.2)	b) Caractéristique de la MLI	64
V)	Commande vectorielle de la MSAP	67
V.1)	Principe de la commande vectorielle	68
V.2)	Le découplage	69
V.2.1)	Découplage par compensation	70
VI)	Autopilotage de la machine synchrone	70
VII)	commande sans capteur mécanique	72
VII.1)	Estimation basée sur les observateurs	72
VII.2)	Détection de la position initiale	72
VII.2.1)	Estimation basée sur la mesure de l'inductance de phase	73
VII.2.2)	Détection de la position à l'arrêt à partir de la saillance magnétique	74
VII.2.3)	Estimation de la position initiale par injection d'un signal à haute fréquence	74
VII.2.4)	Détection de la position initiale par l'application des impulsions de tension	75
VIII)	commande avec capteur mécanique	75
VIII.1)	Le codeur incrémental	75
VIII.1.1)	Principe de fonctionnement	76
VIII.2)	Le codeur incrémental utilisé	77
VIII.2.1)	HEDL-5540-A13 Encoder Line Drivers	77

VIII.2.2) HEDS-9140 Three Channel Optical Incremental Encoder Modules .	78
IX) Conclusion	79
5 Conception et réalisation pratique du kart électrique	81
I) Introduction	81
II) Conception de kart électrique	81
III) Partie mécanique "étapes de conception du kart électrique"	82
III.1) Description des différentes étapes de conception :	82
III.1.1) <u>Matériels</u> :	82
III.1.2) châssis :	82
III.1.3) Motorisation :	82
III.1.4) Motorisation :	82
III.1.5) Sous-virage :	83
III.1.6) Survirage :	83
III.1.7) Courbure :	83
III.1.8) Roulette :	83
III.1.9) Conception du cadre :	83
III.2) Réalisation du châssis et la suspension	84
IV) Partie électrique et électronique "Hardware"	94
IV.1) Carte électronique Launchpad XL F28069M	94
IV.1.1) Introduction :	94
IV.1.2) Installation :	96
IV.1.2.α) Configuration de LAUNCHXL-F28069M :	97
IV.1.2.β) Contrôleurs Piccolo InstaSPIN activés :	97
IV.1.2.γ) 3-phase Inverters :	97
IV.1.3) Mise en route du LAUNCHXL-F28069M :	97
IV.1.3.α) Mise en route :	97
IV.1.3.β) Application de démonstration et la température interne :	97
IV.1.3.γ) Programmer et déboguer l'application :	97
IV.1.4) Configuration matérielle :	97
IV.1.4.α) Domaine de puissance :	98
IV.1.4.β) Connectivité série :	98
IV.1.4.γ) Sélection du mode de démarrage :	98
IV.2) BOOSTXL-DRV8305EVM	99
IV.2.1) Description :	99
IV.2.2) Caractéristiques :	100
V) Partie Software	101
V.1) Code Composer Studio	101
V.1.1) Installez le logiciel :	102
V.1.2) Installez le matériel :	102
V.2) Bibliothèque MotorWare™	102

V.2.1)	Description :	102
V.2.2)	Caractéristiques du logiciel :	102
V.2.3)	Architecture de la Bibliothèque MotorWare	103
V.3)	Module de MotorWare™ Hardware Abstraction Layer (HAL)	104
V.3.1)	introduction :	104
V.3.2)	Architecture de la Bibliothèque :	105
V.3.3)	Définition d'objet :	105
V.3.4)	HAL Global Variables :	107
V.3.5)	Configuration HAL :	107
V.4)	Logiciel MotorControl (SDK) pour MCU C2000™	108
V.4.1)	Description :	108
V.4.2)	Caractéristiques :	108
VI)	Partie Contrôle "Programme"	109
VI.1)	Norme de codage	109
VI.2)	Aperçu Notre Lab Projects	112
VI.3)	Partie Sans Codeur Incrémentale " Sensorless " :	113
VI.4)	Partie avec codeur incrémentale "moteur1, Sensored " :	124
VII)	Conclusion	134

Bibliographie

136

Table des figures

1.1	Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique	21
1.2	Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE	22
1.3	Comparaison de la densité d'énergie pour les différentes technologies de batteries	23
1.4	Architecture monomoteur	24
1.5	Configuration multimoteur.	25
1.6	Architecture multimoteur	25
1.7	présentation du véhicule.	26
1.8	Structure du véhicule.	26
1.9	Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle α	29
1.10	franchissement de pente	32
1.11	franchissement d'obstacles	32
2.1	Batteries au Plomb	37
2.2	Batteries au Nickel	38
2.3	Batterie au Lithium-ion	39
2.4	Classification des moteurs électriques	39
2.5	Principe du moteur à continu	40
2.6	Principe de fonctionnement du moteur asynchrone	40
2.7	Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents	41
2.8	Principe de fonctionnement du moteur brushless	42
3.1	Moteur synchrone à aimants permanents	45
3.2	Moteur brushless.	46
3.3	Moteur brushless à basse tension	47
3.4	Courbe de désaimantation	48
3.5	Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants	48
3.6	Les trois types de rotor du moteur synchrone.	49
4.1	Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère triphasé	56
4.2	Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q)	58
4.3	Schéma de l'association onduleur – MSAP.	64
4.4	Principe de la commande MLI	65
4.5	Schéma équivalent de l'onduleur à MLI	65

4.6	Modèle de l'onduleur sur Simulink	67
4.7	Principe de la commande vectorielle	68
4.8	Modèle de MSAP commandé avec flux orienté et I_d nul	69
4.9	Couplage entre les axes « d » et « q »	69
4.10	Principe du découplage par compensation	71
4.11	Schéma global de la commande vectorielle MSAP	71
4.12	Changement d'état de la sortie du capteur à effet Hall	72
4.13	Changement d'état de la sortie du capteur à effet Hall	73
4.14	Principe de fonctionnement du codeur incrémental	76
4.15	Sens de rotation du codeur incrémental	77
4.16	Conducteurs de ligne d'encodeur	78
4.17	Les sorties complémentaires pour les trois canaux.	78
4.18	sens de rotation du codeur incrémental	79
4.19	Datasheet du codeur incrémental	80
4.20	Signaux en sortie	80
5.1	Schéma de conception du kart.	81
5.2	Conception du cadre avec tube en PVC.	84
5.3	Découpage tube de PVC.	85
5.4	Bois "Multiplis".	85
5.5	Fixage pvc/multiplier.	86
5.6	essieu arrière	87
5.7	Moteurs utilisés	87
5.8	Fixage les deux moteurs avec l'essieu arrière	88
5.9	Accouplement	88
5.10	Le support	89
5.11	Les roues utilisées	89
5.12	Fixage de la roue avec le support	90
5.13	Aperçu des deux roues	90
5.14	Aperçu des deux roues	91
5.15	Une simple volant	91
5.16	La suspension	92
5.17	Couplage moteur réducteur	92
5.18	Structure Générale	92
5.19	structure générale	93
5.20	structure générale	93
5.21	Launchpad XL F28069M. [1]	94
5.22	Présentation de la carte LAUNCHXL-F28069M. [1]	95
5.23	la carte LAUNCHXL-F28069M. [1]	95
5.24	Emulateur & MCU	96
5.25	Jumper 1_4 & 5_8	96

5.26	Orientation du commutateur de démarrage. [1]	99
5.27	BOOSTXL-DRV8305. [2]	100
5.28	BOOSTXL-DRV8305. [2]	101
5.29	Schéma simplifié. [2]	101
5.30	Code Composer Studio	102
5.31	MotorWare Software Stack	104
5.32	intègration entre HAL et l'architecture logicielle.[3]	105
5.33	Configuration HAL	107
5.34	Lab projects. [4]	112
5.35	Diagramme1 De La partie Sans capteur (moteur2)	121
5.36	Diagramme2 de la partie sans capteur (moteur2)	122
5.37	Diagramme3 de la partie sans capteur (moteur2)	123
5.38	Diagramme1 de la partie avec capteur (moteur1)	130
5.39	Diagramme2 de la partie avec capteur (moteur1)	131
5.40	Diagramme3 de la partie avec capteur (moteur1)	132
5.41	Diagramme4 de la partie avec capteur (moteur1)	133

Abréviation

VE : Véhicule électrique.
ZEV : Zero emission vehicle.
ICE : Moteur à combustion interne.
MSAP : Moteur synchrone à aimant permanent.
MCC : Moteur à courant continue.
MAS : Moteur asynchrone.
MI : Moteur à induction.
MRV : Moteur à reluctance variable.
Cr : Couple résistant.
Frt : Effort résistant total.
Rr : Résistance roue.
r : Rayon d'une roue.
Ra : Résistance aérodynamique.
Rp : Résistance due à la pente.
G : Coefficient de gravité.
Fr : Coefficients de frottement.
M : Masse.
 ρ_a : Masse volumique de l'air.
S : Surface frontale du véhicule en $[m^2]$.
Cx : Coefficient de pénétration dans l'air (mesuré expérimentalement).
V : Vitesse du véhicule.
Vv : Vitesse du vent.
Acc : Accélération.
Pb : Plomb.
NiMH : Nickel Métal Hydrure.
NiCd : Nickel Cadmium.
Li-ion : Lithium-ions.
Li-Po : Lithium-Polymère.
BLDC : Moteur Brushless.
AC : Courant alternatif.
DC : Courant continu.
SPMSM : Surface Permanent Magnet Synchronous Motors.
IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motors.
SynRM : Synchronous Reluctance Motor.
Vs : Tensions statoriques.
is : Courants statoriques.
 φ_s : Flux statoriques.
Rs : Résistances du stator.
Lss : Inductance statorique.

φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant.

θ : Angle entre l'axe d et l'axe de référence.

ω : Pulsation électrique.

P : Nombre de paire de pôles de la machine.

ω_r : Vitesse de rotation de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par le moteur.

C_r : Couple résistant.

f : Coefficient de frottement.

j : Moment d'inerte du moteur.

F_{em} : Force électro motrice.

MLI : Modulation de Largeur et d'Impulsion.

Introduction Générale

Le véhicule électrique n'est pas une idée nouvelle. Du XIXème à la fin du XXème siècle, divers modèles ont été expérimentés et ont tenté de rivaliser avec les véhicules thermiques. L'échec a été à chaque fois au rendez-vous, en raison du manque de capacité des batteries et donc de la faible autonomie de ces véhicules, comparés à celle des véhicules thermiques. Cela a prouvé que la polyvalence et l'autonomie étaient au centre des enjeux du développement des véhicules.

La voiture électrique consomme de l'électricité, qui est produite par des centrales qui sont responsables d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution. Mais si on recharge la voiture sur une source d'énergie propre on ne génère pas de CO₂. Il faut donc développer l'électricité à base d'énergie propre même si les facteurs climats (vent, soleil. . .) sont aléatoires. Ce qui permettrait à l'avenir de ralentir la production d'énergie via les centrales nucléaires.

Dans ce contexte, la recherche de nouvelle technologie pour remplacer la voiture à essence constitue un véritable enjeu industriel. Les véhicules électriques sont une alternative prometteuse aux véhicules conventionnels propulsés par des moteurs à combustion interne, offrant la possibilité de réduire le CO₂, les émissions polluantes et sonores. Toutefois, la capacité limitée des batteries constitue un problème majeur devant le développement des véhicules électriques.[5]

Les performances sont alors médiocres, surtout à cause de la masse du véhicule qui implique une réserve d'énergie trop importante au regard de ce que l'on peut stocker actuellement dans les batteries. Pourtant, il existe de nombreuses solutions originales permettant de créer des véhicules totalement innovants, autour de concepts adaptés à l'énergie électrique.

- ❶ Soit le véhicule est léger et il est destiné à des déplacements courts : dans ce cas les accumulateurs actuels sont suffisants.
- ❷ Soit le véhicule est massif et il nécessite une forte puissance : dans ce cas, l'énergie électrique doit être produite par une autre source que la batterie et il s'agit alors du véhicule hybride.

Récemment, plusieurs projets dans ces deux domaines ont vu le jour. D'une manière générale, le plus important est de bien cerner les domaines d'applications du véhicule électrique et de tenir compte de sa spécificité à tous les niveaux de la conception. C'est à cette seule condition que les véhicules électriques ont une chance d'aboutir.

L'objectif du présent travail est de réaliser un véhicule électrique à deux roues motrices commandé par une carte Launchpad XL F28069M, afin d'assurer un bon contrôle. Le présent travail s'organise autour de cinq chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les véhicules électriques, historique, actualités,

Aussi, l'étude des systèmes à propulsion électrique, et la présentation des différentes architectures. Ensuite Nous présentons les configurations des véhicules électriques ainsi que leurs constitutions. Puis on s'intéresse sur les principaux organes de la chaîne de traction. Nous citons enfin quelques Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale.

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse à présenter un aperçu général des véhicules concernés, ensuite les nouvelles technologies des batteries et en fin quelque technologie des moteurs.

Le troisième chapitre montre une présentation de la machine synchrone à aimants permanents, ensuite quelque avantages et inconvénients des msap, présentés aussi une comparaison entre la *MSAP* et les autres machines électriques.

Le quatrième chapitre présente deux stratégies de commande vectorielle de la machine synchrones à aimant permanent. Une première dite sans capteur mécanique qui est basée sur l'estimation de la position du rotor. La deuxième stratégie de commande avec capteur mécanique qui prend la position du rotor via un codeur incrémental. Ensuite, une stratégie de commande pour les onduleurs est exposée.

Le cinquième chapitre est constitué de trois grandes parties, la partie Mécanique qui comprend les étapes de conception du Kart électrique conception/ réalisation du kart électrique, La seconde partie traite l'utilisation de Carte Électronique Launchpad XL F28069M et leur configuration utilisée, ainsi que de la description de l'onduleur utilisé BOOSTXL-DRV8305EVM. Enfin Partie Contrôle "Programme" est consacrée aux généralités sur les normes de codage et le code source de la commande avec et sans codeur incrémentale.

Nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble des résultats obtenus et nous exposons les différentes contributions que nous avons apportées par rapport à l'existant, ainsi que les perspectives que nous envisageons pour la poursuite de ces travaux de recherche.

Chapitre 1

Généralités sur les Véhicules Electriques

Contents

I) Introduction	36
II) But du projet	36
III) Aperçu général des véhicules concernée	36
III.1) Avant-propos	36
III.2) Technologie des batteries	36
III.3) Technologie du moteur	38
IV) Conclusion	42

I) Introduction

Une voiture électrique est une voiture qui est propulsée par un ou plusieurs moteurs électriques, utilisant l'énergie stockée dans des batteries rechargeables. Les premières voitures électriques pratiques ont été produites dans les années 1880 [6]. Les voitures électriques étaient populaires à la fin du XIX siècle et au début du XX siècle, jusqu'à ce que les moteurs à combustion interne, en particulier les démarreurs électriques, et la production en série de véhicules à essence moins chers entraînent une baisse de l'utilisation de véhicules à propulsion électrique.

En 1897, les voitures électriques ont trouvé leur premier usage commercial aux États-Unis. Les taxis de la ville de New York étaient électriques et fabriqués par la société Philadelphian Electric Carriage and Wagon. Au cours du XXe siècle, les principaux fabricants de véhicules électriques aux États-Unis étaient Anthony Electric, Baker, Columbia, Anderson, Edison, Riker, Milburn et autres. Contrairement aux véhicules à essence, les véhicules électriques étaient plus silencieux et ne nécessitaient pas de changement de vitesse. [7]

À partir de 2008, la fabrication de véhicules électriques a connu une renaissance en raison des progrès réalisés dans les batteries, des maladies et des décès dus à la pollution atmosphérique et de la volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

En décembre 2018, environ 5,3 millions de véhicules hybrides tout électriques et rechargeables légers étaient utilisés dans le monde[8]. Malgré la croissance rapide enregistrée, le stock mondial de voitures électriques rechargeables représentait environ un véhicule sur 250 (0,40%) sur les routes du monde à la fin de 2018.

II) Historique [9]

- 1832, Robert Anderson a inventé la 1^{er} véhicule électrique. et en 1838, il a fait un modèle similaire roulant jusqu'à 6 km/h.
- Le Français "Gaston Planté" à inventer en 1859 une batterie rechargeable au plomb acide. Après 22 ans "Camille Faure" à améliorer cette batterie.
- 1891, l'américain « William Morrison" à réalise la première vraie voiture électrique.
- 1899, une Société Belge a construit la première auto électrique à dépasser les 100 km/h (elle atteindra les 105 km/h), cette voiture est munie de pneus Michelin.
- Dès 1900, plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des automobiles à essence et à vapeur.
- 1912, la production des véhicules électriques est à son maximum.
- 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que les véhicules Ford à essence.
- 1966, le congrès américain recommande la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air.
- 1974, la Vanguard-Sebring CitiCar, qui ressemble beaucoup à une voiture électrique type Golf fait son apparition au Electric Véhicule Symposium de Washington D.C. Elle peut rouler sur 64 kilomètres à une vitesse de 48 km/h.
- 1988, la société "GM Roger" à lancer des recherches pour développer une nouvelle voiture électrique EV1
- 1990, l'Etat de la Californie vote le Zero Emission Vehicle (ZEV), un plan qui prévoit que 2% des véhicules devront avoir zéro émission polluante en 1998 (puis 10% d'entre eux pour 2003).
- En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires seront vendus au Japon la première année.
- De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.
- En 2002, G.M. et DaimlerChrysler poursuivent le California Air Resources Board (CARB) pour faire annuler la loi Zero Emission Vehicle (ZEV) de 1990.
- En 2003, le modèle Kangoo Electrode " **Renault** " fait une tentative avec la sortie de sa voiture hybride mais, après 500 véhicules, la production est arrêté.
- En 2003-2004, c'est la fin de l'EV1. GM à récupérer un par un tous les véhicules pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation.

- En 2006, Chris Paine sort un documentaire intitulé *Who Killed the Electric Car ?*, qui prédit l'analyse de montée en puissance et la mort de la voiture électrique à la fin des années 90.
- En 2007, il y avait encore 100 000 véhicules électriques en circulation aux Etats-Unis.

III) Actualités des Véhicules Electriques

A l'heure actuelle, l'ensemble des VE proposés par les constructeurs disposent d'une autonomie comprise entre 70 km et 200 km. Tous ces véhicules étant équipés de batteries. De nouvelles perspectives apparaissent toutefois avec l'utilisation de la pile à combustible. Cette dernière permet d'augmenter considérablement l'autonomie (400 à 450 km pour le moment) pour arriver à des valeurs proches de celles des véhicules thermiques classiques.

Environ 15 kW jusqu'à environ 100 kW, c'est la gamme de puissance. Cependant, les choix sont guidés par l'utilisation de ces véhicules, généralement, 20 à 30 kW suffisent pour un véhicule urbain alors que 40 à 50 kW sont préférables pour une voiture routière [10].

En ce qui concerne la motorisation, les moteurs à courant continu sont toujours aussi répandus, à cause de la simplicité de leur commande en vitesse variable. Cependant, on entrevoit de plus en plus une utilisation massive des moteurs alternatifs en raison de leurs plus faibles coûts. En effet, jusqu'à il y a quelques années, la commande en vitesse variable des machines alternatives était difficile à mettre en œuvre. Celle-ci demandait une puissance de calcul que les processeurs de l'époque ne pouvaient fournir ou seulement à des coûts prohibitifs. Avec les progrès de la technologie, les coûts ont diminué et la puissance de calcul n'a cessé d'augmenter, favorisant ainsi l'émergence de ces machines jusque-là réservées à des applications de plus fortes puissances [10].

Pour ce qui est du prix de ces véhicules, il est encore difficile à établir car les quantités produites sont très faibles, souvent ce ne sont que quelques exemplaires qui sont fabriqués. On peut cependant estimer que si les technologies d'alimentation employées (batteries, pile à combustible) sont fabriquées à grande échelle, alors les prix seraient comparables à ceux des véhicules thermiques. En effet, le prix de l'alimentation constitue la part la plus importante du coût d'un véhicule électrique [10].

IV) Définition d'un Véhicule Electrique

Un véhicule électrique (VE), également appelé véhicule à propulsion électrique, est un véhicule qui utilise un ou plusieurs moteurs électriques pour sa propulsion. Selon le type de véhicule, le mouvement peut être assuré par des roues ou des hélices entraînées par des moteurs rotatifs ou, dans le cas des véhicules à chenilles, par des moteurs linéaires. Les véhicules électriques peuvent comprendre des voitures électriques, des trains électriques, des camions électriques, des avions électriques, des bateaux électriques, des motos et scooters électriques et des engins spatiaux électriques.

Une voiture électrique est une voiture à carburant de remplacement qui utilise des moteurs électriques et des contrôleurs de moteur pour la propulsion, à la place de méthodes de propulsion plus courantes telles que le moteur à combustion interne (ICE). L'électricité peut être utilisée comme

carburant de transport pour alimenter les véhicules électriques à batterie (VE). Les véhicules électriques stockent l'électricité dans un dispositif de stockage d'énergie, tel qu'une batterie. L'électricité alimente les roues du véhicule via un moteur électrique. Les véhicules électriques ont une capacité de stockage d'énergie limitée, qui doit être reconstituée en le branchant à une source électrique.

V) Description générale de la chaîne de traction

La chaîne de traction d'un véhicule tout électrique peut être décomposée en éléments décrits dans la Figure 5.41. Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique, le contrôle et enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est adaptée la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur [10]. Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique.

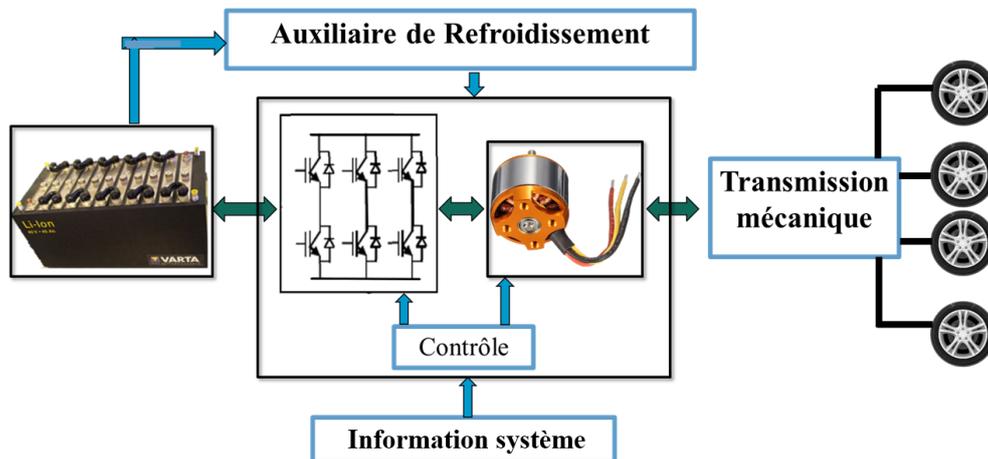


FIGURE 1.1 – Schéma fonctionnel de la chaîne de traction d'un véhicule tout électrique

V.1) Le Moteur Electrique d'Entrainement (MSAP, MSAB, MCC, MAS...)

Les performances globales d'un véhicule électrique dépendent du type de moteur d'entraînement employé. Le véhicule électrique, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoient progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries. De manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminée au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes :

- ❶ Assurer un démarrage en cote du VE (couple élevé).
- ❷ Obtenir une vitesse maximale.
- ❸ Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (rendement élevé en étant employé à différentes vitesses).

Ces quelques caractéristiques typiques requises pour les machines utilisées dans les systèmes de propulsion électrique, sont bien illustrées sur la Figure 1.2 exhibant l'évolution du couple/puissance-vitesse.

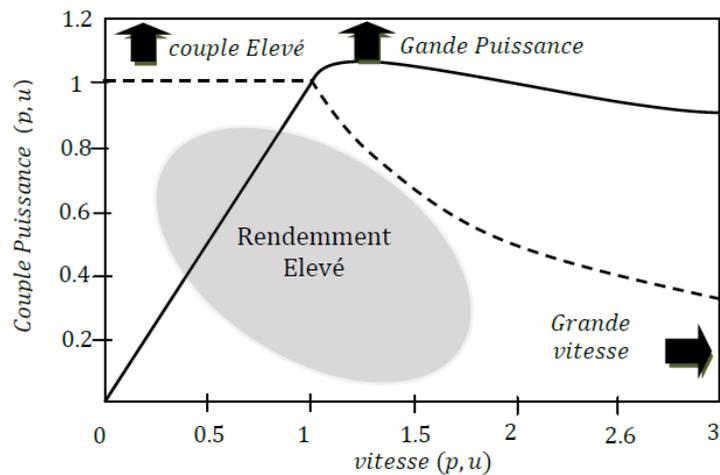


FIGURE 1.2 – Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE

Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entraînements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que : le moteur à courant continu (MCC), à Induction (MI), Synchrone à Aimant Permanent (MSAP), à Reluctance Variable (MRV) etc.

En plus des caractéristiques de fonctionnement citées précédemment, d'autres considérations importantes de conception sont à prendre en considération à savoir : coût et encombrement acceptables.

V.2) Convertisseur statique

Le principe d'alimentation par convertisseurs statiques consiste à imposer des tensions ou des courants variables en amplitude et en phase en fonction des caractéristiques électromécaniques désirées. Il existe essentiellement deux types de convertisseurs statiques qui permettent de réaliser ces deux opérations : le cyclo convertisseur et l'onduleur. Nos travaux ont été restreints au cas de l'alimentation par onduleur [11].

Le convertisseur statique utilisé dans la chaîne de traction est un onduleur. Ils permettent d'obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue fixe.

V.3) Batterie

Les circuits de bord des véhicules électriques nécessitent une alimentation fournie par une batterie. Pour réaliser des batteries capables de rendre crédible une offre de voiture électrique sur le marché, les chercheurs du monde entier travaillent à relever différents défis :

- * Augmenter la capacité de stockage d'énergie des batteries des voitures électriques.
- * Diminuer les temps de charge des batteries des VE.

- ✳ Améliorer la sécurité des batteries des VE.
- ✳ Diminuer les couts des batteries des VE.
- ✳ Renforcer l'approvisionnement et le recyclage du Silicium des batteries du VE.

Pour les véhicules électriques, la technologie utilisée actuellement est celle des batteries. Ces éléments permettant de stocker de l'énergie doivent remplir les conditions suivantes :

- Une bonne puissance massique (rapport puissance/poids).
- Une bonne énergie massique (Wh/Kg) étant synonyme d'une bonne autonomie.
- Une tension stable engendrant des performances régulières.
- Une durée de vie élevée, calculée en nombre de cycles chargement/déchargement, conduisant à une diminution du coût pour l'utilisateur.
- Disposer d'un faible entretien et constitués d'éléments facilement recyclables.

Les performances ne sont pas très élevées et elle possède une durée de vie trois fois moindre que celle de la pile à combustible. Sur la figure 1.3 sont classifiées les batteries selon leurs énergies spécifiques et leurs énergies volumiques.

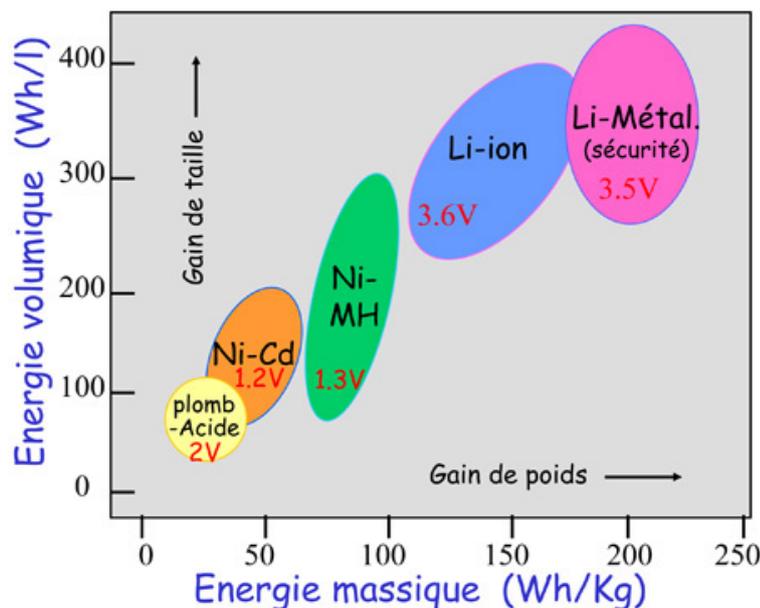


FIGURE 1.3 – Comparaison de la densité d'énergie pour les différentes technologies de batteries

VI) Différentes configurations de véhicule électrique

On envisage actuellement deux types de véhicules électriques :

- Les véhicules à motorisation purement électrique : véhicules électriques.
- Les véhicules à motorisation mixte électrique et thermique : véhicules hybrides.

Le présent chapitre ne concerne que les véhicules électriques, qui se trouvent actuellement au stade du pré série industrielle. Notons, de plus, que la motorisation hybride actuelle, outre son coût

élevé, présente un rendement global faible, car l'énergie primaire subit de très nombreuses conversions (thermodynamique, mécanique, électrodynamique, électrochimique). Notre objectif, n'est pas de faire un état de la technologie des véhicules électrique, mais d'établir une liste non exhaustive de quelques ébauches de solutions aux problèmes de la motorisation d'un véhicule électrique. Cette dernière, est proposée sous une forme soit monomoteur, soit multimoteurs.

VI.1) Véhicule électrique monomoteur

Architecture avec moteur synchrone à aimant permanent :

- Une batterie.
- un onduleur.
- une machine synchrone à aimants permanents.
- un réducteur différentiel (réduction de la vitesse, augmentation du couple).

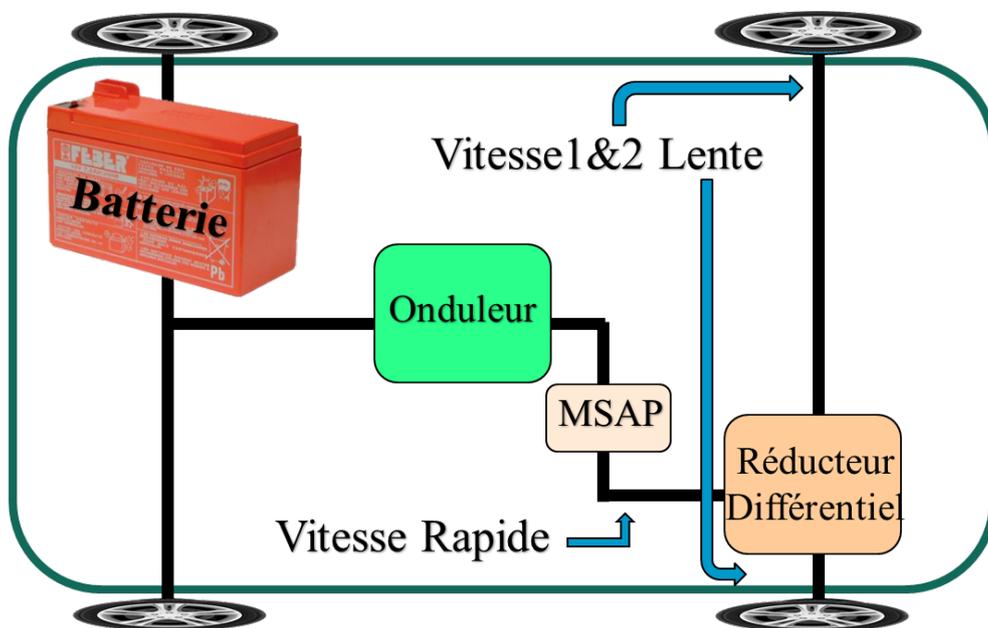


FIGURE 1.4 – Architecture monomoteur

VI.2) Véhicule électrique multimoteurs

Le véhicule électrique multimoteurs présente plusieurs chaînes de traction indépendantes, Figure 1.5, Il peut sembler a priori intéressant de motoriser indépendamment les roues pour supprimer les organes de transmission mécanique comme la boîte de vitesse, l'embrayage et le différentiel mécanique.

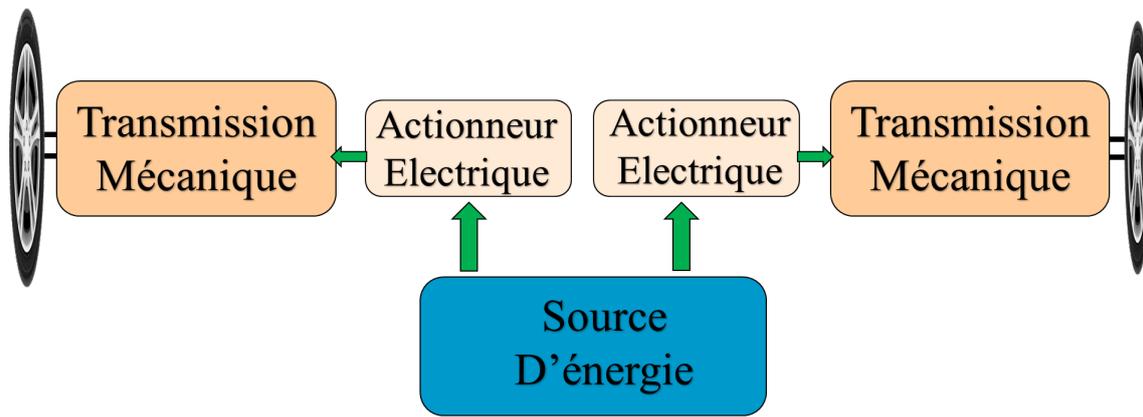


FIGURE 1.5 – Configuration multimoteur.

On peut donc réaliser des véhicules à deux roues motrices, soit à l'arrière où à l'avant figure 1.6.

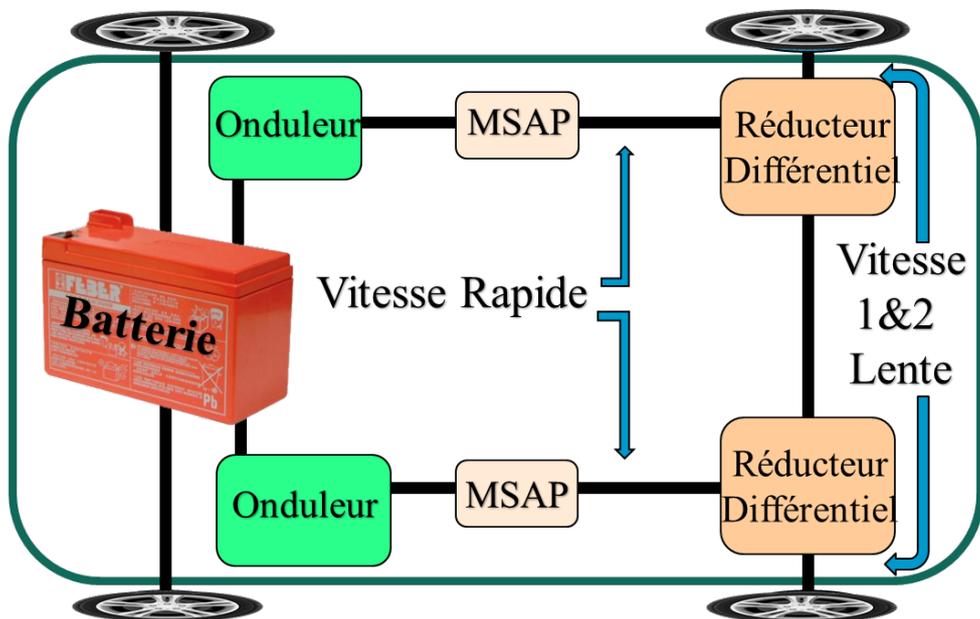


FIGURE 1.6 – Architecture multimoteur

VII) Structure du véhicule électrique

Le véhicule sur lequel sera implémentée l'architecture de contrôle est schématisé par une plate-forme rectangulaire montée sur deux roues. Le véhicule est constitué de deux roues motrices parallèles à l'arrière.

Chacune de ces deux roues est entraînée indépendamment l'une de l'autre par un actionneur à courant alternatif. L'équilibre de la plate-forme est garanti par deux roues libres en avant. Le changement de direction est obtenu manuellement figure 1.7).

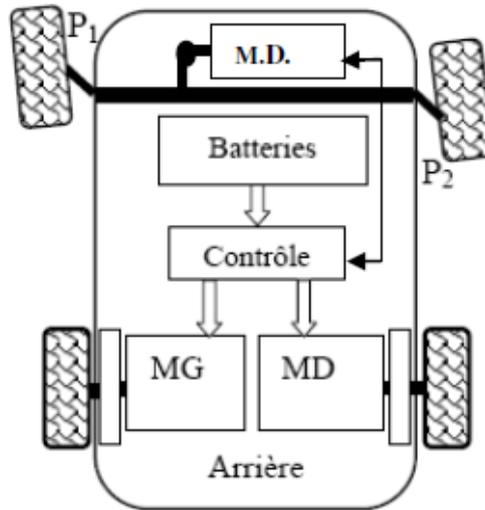


FIGURE 1.7 – présentation du véhicule.

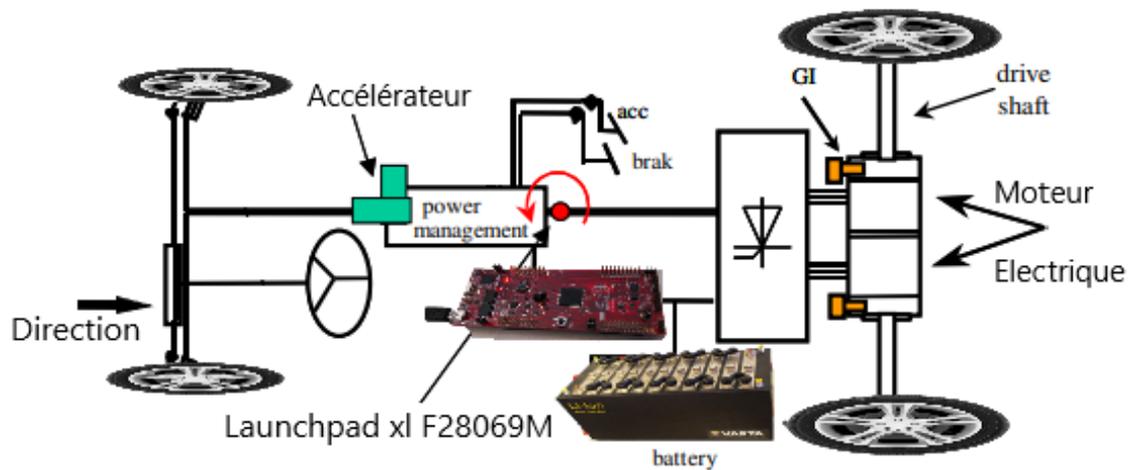


FIGURE 1.8 – Structure du véhicule.

VII.1) Critères de choix des roues motrices

Les roues motrices du véhicule doivent être identifiées très tôt dans un tel projet puisque les performances du véhicule dépendent grandement de leurs dimensions. Le couple fourni par le moteur ainsi que la vitesse maximale du véhicule sont des exemples de paramètres qui varieront en fonction du rayon des roues motrices.[12]

Les critères que nous avons considérés pour le choix des roues motrices ont été établis en fonction des performances que nous désirions obtenir. Pour obtenir une accélération intéressante, il est nécessaire de choisir des roues de rayon assez faible puisque l'inertie de rotation vue par le moteur est directement proportionnelle à ce rayon au carré. Par contre, la vitesse maximale étant elle inversement proportionnelle à ce rayon, il est important de ne pas trop le diminuer. D'où un compromis entre ces deux exigences antagonistes.

L'accélération maximale dépendra également de l'adhérence du pneu. L'adhérence latérale dépend aussi de la forme des roues, ainsi que du matériau de la surface de contact avec le sol.

VII.2) Critères de choix des roues libres

Les roues libres assurent la stabilité du véhicule pour les différents mouvements possibles. Plus le poids et la friction de ces roues seront importants, plus les perturbations ne seront importantes. Nous cherchons donc à obtenir une roue libre qui offre un roulement à friction très faible. Les deux roues arrière sont libres en rotation et suivent librement les changements de direction du véhicule.

VII.3) Choix des actionneurs

Dans notre étude nous avons choisi le moteur synchrone à aimants permanents en raison de se prêtent facilement à un contrôle souple, réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Par ailleurs, la commande de ce moteur dans ce type d'application constitue un domaine de recherche et d'intense activité jusqu'à ce jour.

VIII) Modélisation dynamique du véhicule

Dans le but d'étudier la commande du véhicule, il est nécessaire de disposer d'un modèle qui rend compte de la dynamique du véhicule à partir des efforts de traction développés par ses actionneurs et des forces de résistance au déplacement. Ainsi, cette section a pour objectif ; la modélisation de la dynamique du véhicule. Ce dernier est un système intrinsèquement non linéaire de par sa cinématique et ses caractéristiques dynamiques comme les éventuels glissements sur la chaussée, les fluctuations d'adhérence sur la route, le comportement des pneus ou encore l'inertie inhérente à tout système mécanique. Tous ces phénomènes sont complexes et difficiles à appréhender.

La commande d'un tel système est donc un problème qui, pour être résolu de façon satisfaisante, doit prendre ces non-linéarités en considération.

Dans un premier temps, nous décrivons les différentes contraintes dynamiques sur le véhicule qui détermine les limites à ne pas dépasser. Ces contraintes ont donc une influence sur les trajectoires autorisées pour le véhicule.

VIII.1) Contraintes dynamiques sur le véhicule

Il faut bien étudier les contraintes dynamiques, car le véhicule étant un système mécanique réel, il est évident qu'il existe des limites sur les forces ou les couples qui peuvent être générés. Des critères prennent en compte la vitesse et l'accélération maximale pour éviter les problèmes de dérapage et de patinage.

VIII.1.1) Contraintes d'accélération 'accélération et freinage' :

Les contraintes d'accélération sont simples mais néanmoins importantes. Il est clair que le moteur a une borne maximale sur l'accélération γ qu'il peut fournir. Cela se traduit par :

$$\gamma = \gamma_{Max} \quad (1.1)$$

De même, le freinage du véhicule est contrôlé par une force de freinage qui est proportionnelle à la décélération des roues. Cette nouvelle contrainte impose :

$$\gamma_{Min} \leq \gamma \leq \gamma_{Max} \quad (1.2)$$

VIII.1.2) Contrainte de vitesse maximale :

Il semble naturel que le véhicule aura une vitesse maximale. Alors la cinématique du véhicule peut être exprimée avec les contraintes additionnelles suivantes :

$$0 \leq V_x \leq V_{xMax} \quad (1.3)$$

$$\omega_{Min} \leq \omega \leq \omega_{Max} \quad (1.4)$$

VIII.1.3) Contrainte de non-glissement :

La contrainte de non-glissement réduit encore l'ensemble des accélérations admissibles. Il est nécessaire de prendre en compte les glissements en faisant référence au coefficient de glissement μ qui définit dans quelles circonstances un glissement aura lieu connaissant la force normale à la surface de contact.

Si F tangentielle $\geq \mu$ F normale alors il y aura glissement [13], [14]. Donc, on peut exprimer la relation précédente comme suit :

$$M\gamma \geq \mu M.g \quad (1.5)$$

Ce qui implique :

$$\sqrt{V_x^2 + V_y^2} \geq \mu.g \quad (1.6)$$

Où : M : Masse du véhicule. γ : Accélération tangentielle du véhicule. g : Accélération de pesanteur.

Donc la contrainte de non-glissement se traduit par :

$$V_x^2 + V_y^2 \leq \mu^2.g^2 \quad (1.7)$$

Quand cette expression n'est pas vérifiée, il s'ensuit que le véhicule ne peut suivre sa trajectoire. Cette contrainte de non-glissement est une forme extrêmement simplifiée. Cependant, les modèles

d'adhérence aujourd'hui disponibles sont souvent compliqués et font appel à de nombreuses données empiriques. Pour donner une idée de la complexité du phénomène d'adhérence, on notera que la force d'adhérence est fonction de nombreux paramètres pas toujours bien maîtrisés, [15] :

VIII.1.4) Force d'entraînement :

Quand le véhicule se déplace, les couples des moteurs appliqués aux roues motrices produisent une force F qui est parallèle à l'axe X_v . Cette force est contrainte par l'expression :

$$0 \leq F \leq F_{max} \quad (1.8)$$

VIII.2) Importance du calcul de la vitesse et de l'accélération maximale

Lorsqu'un véhicule se déplace dans un virage, la force centrifuge le pousse hors de la courbe avec une valeur dépendante de la vitesse et du rayon de courbure. Pour cette force, il n'y a pas besoin d'un point d'appui matériel, elle est produite par l'inertie du corps. Par contre, afin d'effectuer le virage, l'accélération normale produite par l'angle de rotation pousse le véhicule dans le sens contraire.

Les roues posées sur le sol doivent produire la force centripète qui ramène le véhicule dans la courbe. Ces deux forces en équilibre vont se traduire par un déplacement correct, sinon le déséquilibre produira la dérive du véhicule. Cette dérive a lieu à cause d'une adhésion des roues au sol qui ne correspond pas à la vitesse de déplacement.

Lors d'un démarrage, les roues motrices imposent une force de traction au véhicule qui va engendrer le mouvement, si cette force est très importante, les roues patinent.

Décomposons le poids du véhicule en une composante dirigée vers le centre de la trajectoire du véhicule, et une composante oblique, dirigée vers le sol, Figure 1.9, Soit α l'inclinaison de la composante oblique sur la verticale.

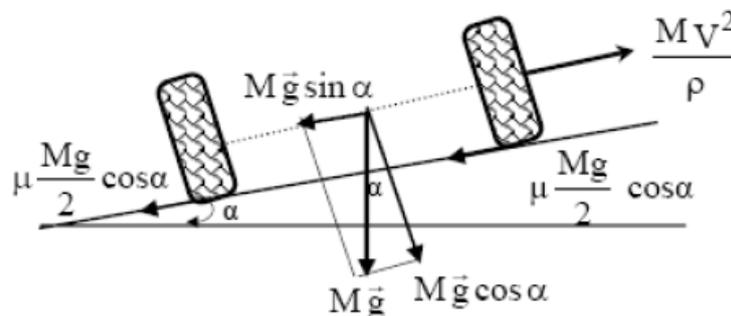


FIGURE 1.9 – Déplacement du véhicule dans un virage sur une chaussée inclinée d'un angle α

La condition de non dérapage se traduit par :

$$\frac{MV^2}{\rho} \leq (M.g. \sin \alpha + \mu M.g. \cos \alpha) \quad (1.9)$$

Où :

ρ : Rayon du virage.

V : Vitesse du véhicule.

μ : Coefficient de friction des pneus du véhicule sur la route.

Par suite, la valeur maximale V_{max} de la vitesse avec laquelle le véhicule peut aborder le virage sans risque de dérapage vaut :

$$V_{max} = \sqrt{\mu \cdot g \cdot \rho} \quad (1.10)$$

Pour diminuer le risque de dérapage, nous pouvons :

- > Diminuer la vitesse du véhicule V .
- > Augmenter le rayon de courbure ρ de la trajectoire.
- > Augmenter le coefficient de friction des pneus du véhicule.

Pour virer, le véhicule doit donc incliner son plan vers la concavité du virage. L'inclinaison dépend de la vitesse et du rayon de la trajectoire ; plus le véhicule va vite et vire court, plus il doit s'incliner. La vitesse maximale est donc contrainte par les mouvements en rotation.

VIII.3) Couples résistant au déplacement

Le couple résistant à la roue ($C_{r\text{ roue}}$) lié à l'effort résistant total (F_{rt}) que doit vaincre le système de motorisation est donné par la relation :

$$C_{r\text{ roue}} = F_{rt} \cdot r = [R_r \cdot R_a \cdot R_p] \cdot r \quad (1.11)$$

Où : R_r : Résistance au roulement.

R_a : Résistance aérodynamique.

R_p : Résistance due à la pente.

r : rayon d'une roue.

Nous raisonnerons sur un véhicule de masse M , à deux roues motrices de rayon extérieur r situées à l'avant, son accélération est γ , sa vitesse V . Tous les couples résistants seront exprimés en fonction du facteur $\frac{Mg r}{2}$ caractéristique du véhicule.

VIII.4) Roulement uniforme sur sol plat

Les efforts résistants sont alors :

- > La résistance au roulement qui fait intervenir les pertes d'énergie se produisant dans la surface de contact entre la roue et la surface de roulement.
- > La résistance aérodynamique.

VIII.5) Franchissement de pente

L'expérience montre que la force qu'il faut appliquer à une roue pour la faire avancer en tournant est égale au produit du poids Mg par le coefficient de frottement de roulement f_r .

$$R_r = f_r \cdot M \cdot g \quad (1.12)$$

g : accélération due à la gravité (9.81m/s²).

M : masse totale du véhicule (kg)

f_r : coefficient caractérisant la résistance au roulement dépend de la nature et de l'état du bandage de la roue, du sol et de la vitesse de déplacement

Nous donnons ci-dessous quelques valeurs indicatives de f_r en fonction de l'état du terrain :

- Pneumatique sur bon terrain : $f_r = 0.015$ à 0.03
- Pneumatique sur mauvais terrain : $f_r = 0.15$
- Pneumatique en tout terrain : $f_r = 0.2$ à 0.3

VIII.6) Franchissement d'obstacles

L'expression de la résistance aérodynamique est la suivante

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot S \cdot C_x \cdot (V + V_v)^2 \quad (1.13)$$

Ou :

ρ_a : désigne la masse volumique de l'air ($\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$).

S : est la surface frontale du véhicule en [m^2].

C_x : est le coefficient de pénétration dans l'air (mesuré expérimentalement).

V : est la vitesse du véhicule en [m/s].

V_v : est la vitesse du vent en [m/s].

En l'absence de vent, on peut considérer cette force comme proportionnelle au carré de la vitesse du véhicule. La résistance aérodynamique n'intervient réellement qu'à partir de 60Km/h, mais devient rapidement prépondérante ensuite.

Le couple maximum de roulement à plat (hors pertes dans la transmission) sera donc, pour une roue :

Croulement = $0.08 \text{ Mgr}/2$ véhicule avec pneumatiques.

Croulement = $0.01 \text{ Mgr}/2$ véhicule avec bandage plein

VIII.7) Franchissement de pente

Appliquer le théorème de la résultante dynamique Figure 1.10, dans l'hypothèse d'un mouvement uniforme, conduit à l'équation suivante :

$$R_p = M \cdot g \cdot \sin \phi \quad (1.14)$$

Le couple nécessaire au franchissement vaut pour une roue :

$$C_p = R_p.r = \frac{1}{2}M.g.r. \sin \phi \quad (1.15)$$

Où :

- M : masse du véhicule en [kg],
- g : l'accélération de pesanteur,
- r : rayon d'une roue,
- ϕ : angle de la pente.

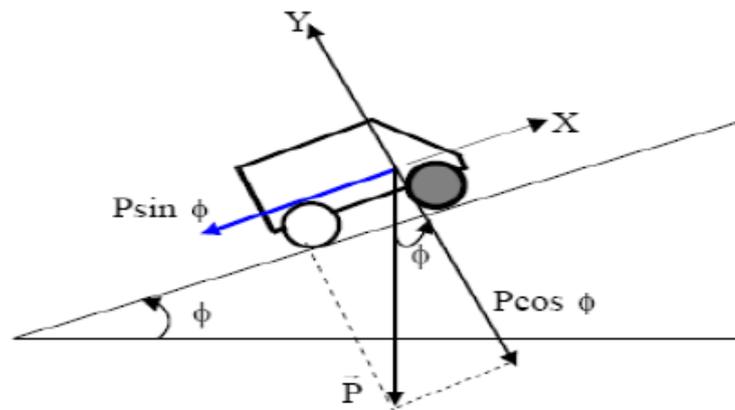


FIGURE 1.10 – franchissement de pente

VIII.8) Franchissement d'obstacles

Le véhicule doit, en principe, pouvoir franchir des obstacles jusqu'à une hauteur h égale au demi rayon de roue $r/2$ Figure 1.11.

Le couple nécessaire au franchissement est :

$$C_f = R_p.r = \frac{1}{2}. \sin \phi.M.g.r \quad (1.16)$$

Avec : $\phi_{max} = 60^\circ$

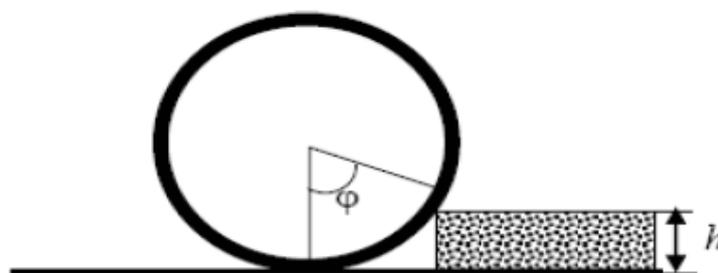


FIGURE 1.11 – franchissement d'obstacles

Notons que ce couple estimé est surdimensionné ; en effet [13]

- Un obstacle n'est jamais attaqué à vitesse nulle.

- L'adhérence naturelle de la bande de roulement et/ou l'écrasement du pneumatique facilitent le franchissement.

Le rayon de la roue doit être le plus grand possible, pour faciliter le franchissement des obstacles.

VIII.9) Accélération

La résistance inertielle totale vaut :

$$R_i = M.\gamma + \sum J \quad (1.17)$$

Au maximum, le deuxième terme est couramment estimé à 15% du premier. Le couple nécessaire à l'accélération du véhicule est donc, pour une roue [14] :

$$C_{acc} = 1,15 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot M \cdot g \cdot \frac{r}{2} \quad (1.18)$$

Notons que (γ/g) caractérise la performance du véhicule en accélération.

IX) Conclusion

Nous venons de présenter, dans ce chapitre un historique sur le véhicule électrique, et un aperçu sur leur actualité récente, ainsi que les éléments constituant une chaîne de traction ainsi les différentes configurations et/ou architectures existant. Par la suite nous avons abordé un aperçu général des véhicules concernés

Chapitre 2

Etat de l'art du véhicule électrique et choix du convertisseur de puissance

Contents

I)	Introduction	45
II)	Présentation de la machine synchrone à aimants permanents	46
II.1)	Structure	46
II.2)	Aimants permanents	47
II.3)	Types de rotor d'une <i>MSAP</i>	49
III)	Couple des machines synchrones à aimants permanents	49
IV)	Avantages et Inconvénients des <i>MSAP</i>	50
IV.1)	Avantages des <i>MSAP</i>	50
IV.2)	Inconvénients des <i>MSAP</i>	50
V)	Comparaison entre la <i>MSAP</i> et les autres machines électriques	50
VI)	Domaines d'application des moteurs synchrones	51
VII)	Conclusion	52

I) Introduction

Nous allons découvrir dans ce chapitre l'objectif du projet PFE, un aperçu général des véhicules concernée et les technologies les plus utilisée des batteries et des moteurs

II) But du projet

L'objectif de ce projet de fin d'étudier et réaliser un kart électrique.

Cette réalisation comporte deux grandes parties :

Partie programme : Cette partie est consacrée à synthétiser deux commandes différentes pour les deux moteur, une commande vectorielle avec codeur incrémental pour le premier et l'autre sans capteur mécanique pour le deuxième moteur.

Partie réalisation : La partie mécanique elle comporte l'étude et la réalisation du châssis avec coût minimal, le choix des roues, le choix des deux réducteurs de vitesse pour les deux moteurs qu'on a, et la réalisation de la suspension adéquate.

III) Aperçu général des véhicules concernée

III.1) Avant-propos

Les karts sont par définition des engins qui n'ont pas de suspension, ni de différentiel. Le diamètre des roues est imposé à 25cm (10pouces). L'accélération est d'environ de 4.5s pour atteindre 50m et 6.5s pour 100m. Les moteurs tournent à 1800 tr/mn ce qui entraine un entretien et une usure importante des pièces mécaniques. La masse d'un kart avec le pilote est d'environ 170 kg.

L'évolution des karts électriques a été rendue possible grâce aux moteurs qui fonctionnent sous faible tension et aux nouvelles batteries au lithium

III.2) Technologie des batteries

En tant que composants autonomes de stockage, les batteries sont des accumulateurs d'énergie qui ont une durée de vie et un nombre de cycles prédéterminés à l'avance par le climat (température ambiante) et par le type d'utilisation que l'on va en faire (profondeur de décharge).

Leur durée de vie, dépend de leur qualité de fabrication et du type de technologie.

Toutes les batteries, quel que soit le type de fabrication, ont deux caractéristiques communes :

- la tension, exprimée en Volts (V)
- la capacité donnée en Ampères heures (Ah)

III.2.1) Les différents types de batteries

III.2.1.α) Batteries au plomb On y trouve deux sortes :

- Les batteries au plomb ouvertes avec un électrolyte d'acide sulfurique dilué d'eau distillée. Elles ont la particularité d'être des accumulateurs fiables, dont la technologie est bien connue

et maîtrisée. Elles ont l'inconvénient d'être influencées fortement par la température ambiante qui baisse fortement leur capacité. De plus, elles demandent un entretien régulier (remise à niveau avec de l'eau distillée), leur électrolyte s'évaporant avec le temps.

- Les batteries au plomb fermées avec un électrolyte gélifié. Elles ont l'avantage d'être sans entretien, facilement manipulable (pas de fuite) avec une stabilité parfaitement contrôlée par le fabricant. Elles ont les inconvénients d'être plus chères et d'avoir une durée de vie plus courte. Elles fournissent en général environ 400 cycles à 80 % de décharge.



FIGURE 2.1 – Batteries au Plomb

III.2.1.β) Batteries au nickel On y trouve les batteries NiMH (Nickel Métal Hydrure) qui ont quasiment remplacé les NiCd (Nickel Cadmium) qui posaient des problèmes de recyclage du cadmium.

Les NiMH ont une grande densité énergétique et peuvent être complètement déchargée sans porter préjudice à leur durée de vie.

Elles ont l'inconvénient d'être de faible capacité, ce qui en fait des accumulateurs plutôt destinés à alimenter des appareils portables où l'autonomie dépasse rarement quelques heures.

Elles fournissent en général entre 500 et 700 cycles à 80 % de décharge.

III.2.1.γ) Batteries au Lithium : Ce sont des accumulateurs électrochimiques dont la réaction chimique est fondée sur l'élément Lithium. Cette technologie très jeune, est tout de même prometteuse et en développement constant.

Il existe trois types principaux de batterie au Lithium :

- ▶ Lithium-métal : l'électrode négative est composée de Lithium métallique (dangereuses et explosives).
- ▶ Lithium-ions : composés d'une électrode positive (cathode) et d'une électrode négative (anode), séparée physiquement par une membrane poreuse. Une solution électrolytique dans la batterie assure le transport interne des ions.



FIGURE 2.2 – Batteries au Nickel

- ▶ Lithium-Polymère : C'est une variante et une alternative aux Lithium-ion, ils délivrent un peu moins d'énergie, mais sont beaucoup plus sûrs.

III.3) Technologie du moteur

Au contraire des batteries, les moteurs électriques sont souvent considérés comme des organes dont la technologie est éprouvée. Néanmoins, le développement d'un groupe motopropulseur électrique doit répondre à des impératifs de coûts, de performance, de rendement. Au final, il reste encore de nombreux axes d'amélioration dans la conception d'un moteur électrique.

Un groupe motopropulseur électrique se décompose en 3 sous-ensembles :

- le moteur électrique qui va convertir l'énergie électrique en énergie mécanique pour mettre en mouvement la véhicule.
- l'électronique de puissance qui transforme et transporte l'énergie stockée dans la batterie vers les 2 moteurs.
- la boîte de vitesses ou le réducteur, généralement constitué d'un seul rapport de réduction.

III.3.1) Type des moteurs

Selon le type du courant absorbé, on peut classer les moteurs électriques on deux type

- Les moteurs à courant continue,
- Les moteurs à courant alternatif.



FIGURE 2.3 – Batterie au Lithium-ion

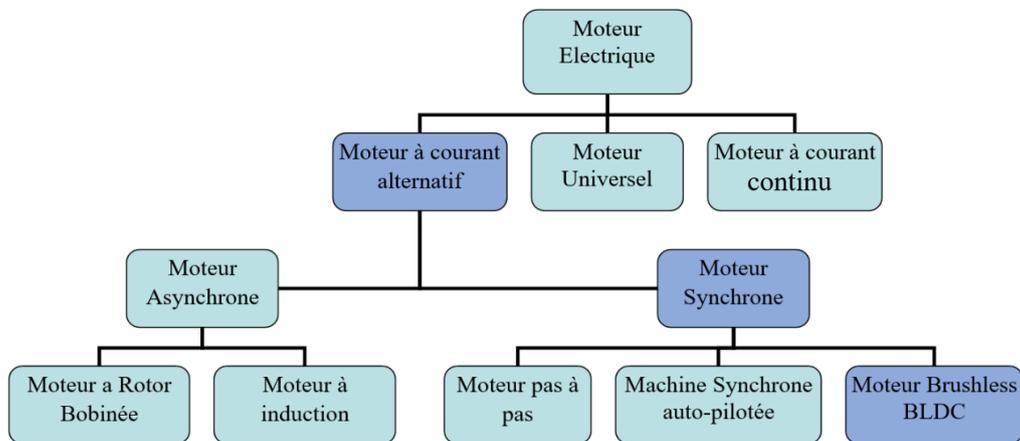


FIGURE 2.4 – Classification des moteurs électriques

Les types de moteurs électriques utilisés actuellement dans la construction des karting sont exposés ci-dessous :

III.3.2) Moteur à courant continu

Ce moteur est utilisé plutôt pour les petites puissances. Ce moteur est facile à piloter en variation de vitesse. Son principe de fonctionnement repose sur la force de Laplace.

III.3.3) Moteur asynchrone

On ne présente plus la machine asynchrone, c'est le moteur utilisé au quotidien dans les applications domestiques machine à laver, à l'atelier, à l'usine machinerie d'entraînement ainsi que dans les domaines spécialisés (traction ferroviaire, maritime, auxiliaires dans les centrales..) [16]

Le stator est composé de trois bobines positionnées en 120° figure 2.6 alimentées par un système de courants triphasés créant chacune un champ magnétique variable. La composition de ces trois

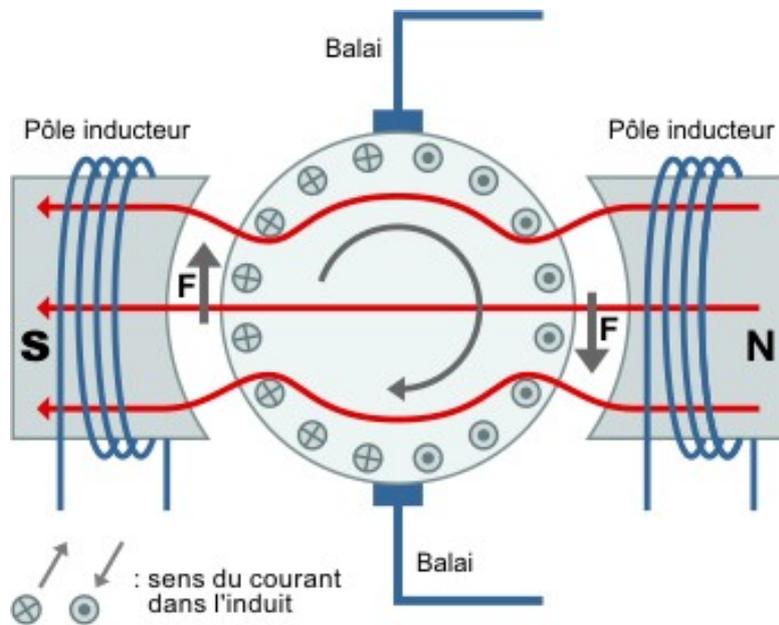


FIGURE 2.5 – Principe du moteur à continu

champs magnétiques crée un champ magnétique tournant.

L'interaction entre ce champ magnétique tournant et le rotor (bobinée ou bien a cage) crée un courant électrique qui circule dans ce dernier. Le courant électrique crée à son tour un champ magnétique qui va suivre le champ tournant entraînant le rotor en rotation par la création d'une force électromagnétique.

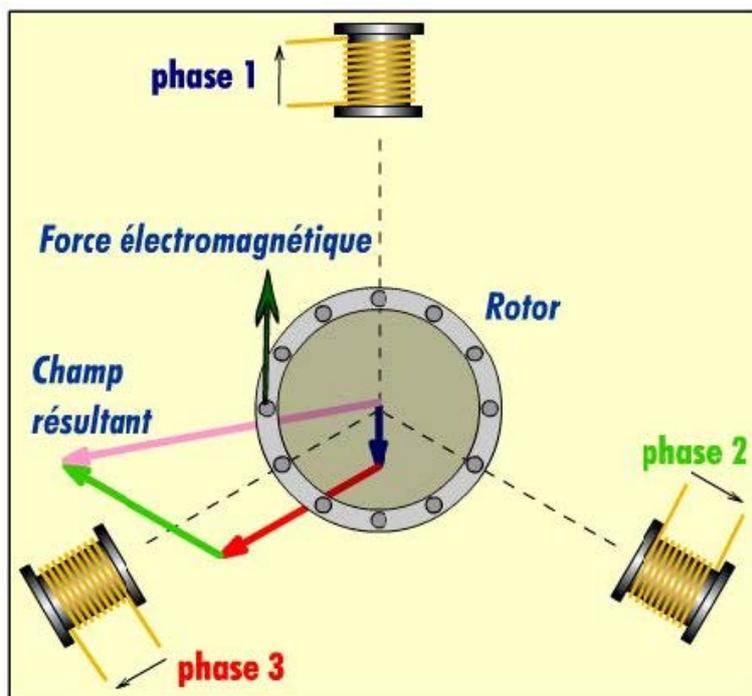


FIGURE 2.6 – Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

III.3.4) Moteur synchrone à aimant permanent

Les moteurs à aimants permanents sont les moteurs les plus communs au sein des véhicules électriques actuels. Les aimants sont intégrés dans le rotor. Ceux-ci vont réagir avec le champ magnétique tournant du stator, Le stator comme celui du moteur asynchrone est alimenté en courant alternatif. À savoir que 2 pôles identiques (Nord / Nord ou Sud / Sud) se repoussent et 2 pôles inverses (Nord / Sud) s'attirent. C'est ce principe qui va mettre en mouvement le rotor. Ce type de moteur a un très bon rendement sur une large plage de régimes et reste simple en matière de conception.

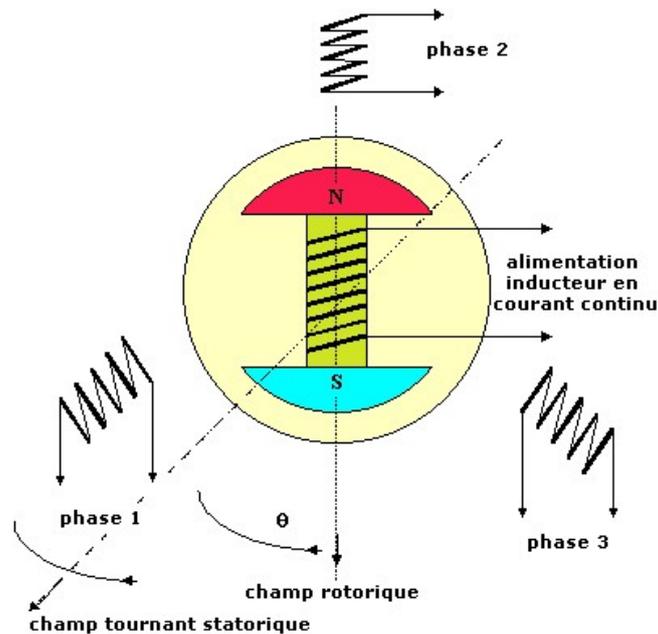


FIGURE 2.7 – Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents

III.3.5) Moteur brushless

Lorsque l'inducteur est à aimant permanent, que le stator est alimenté par un variateur commandé par un capteur placé sur l'arbre (codeur) ; on parle d'un moteur brushless. Son fonctionnement est identique à un moteur à courant continu sans (less) balais (brush).

Un moteur brushless entre dans la catégorie des machines alternatives synchrones. Le moteur brushless fonctionne à partir de trois sources de tensions variables, fournies par un onduleur, et permettant de générer un champ magnétique tournant. Le rotor, généralement équipé d'un aimant permanent, tend à suivre le champ magnétique tournant. La figure 2 montre l'architecture du moteur et de son onduleur.

Dans le cas simple du moteur BLDC, à chaque commutation, deux phases sont reliées respectivement à la tension d'alimentation et à la masse, et une phase n'est pas connectée.

III.3.6) Choix du moteur

Parmi les moteurs cités nous avons choisi le moteur brushless DC parce qu'il accumule les avantages des autres moteurs :

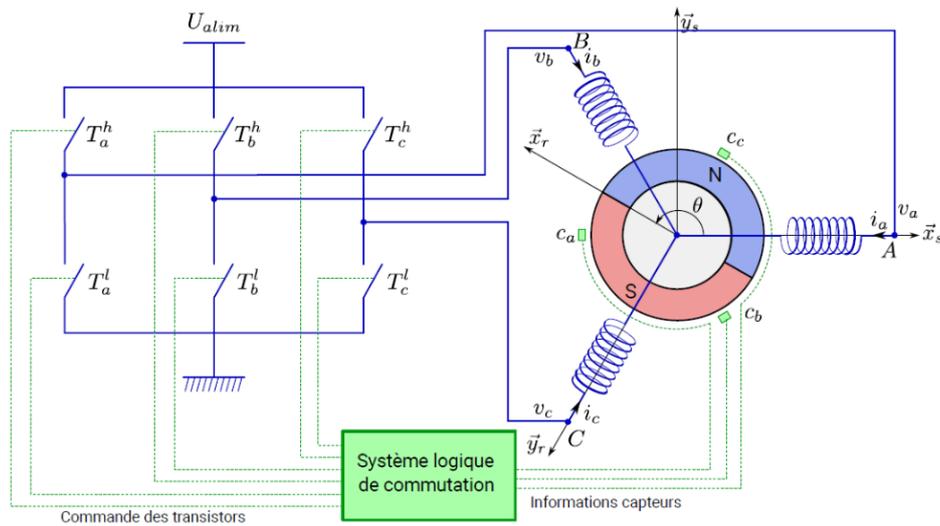


FIGURE 2.8 – Principe de fonctionnement du moteur brushless

Comparé au moteur à courant continu il a une durée de vie plus longue et une fiabilité supérieure. Les soucis liés au frottement des balais sur le collecteur disparaissent : plus de parasites, plus d'échauffement du collecteur et de pertes dues à l'étincelage, plus d'usure mécanique.

Comparé au moteur asynchrone il a un meilleur rendement et une puissance massique intéressante, c'est à dire pour une taille à peu près identique, le moteur BLDC sera donc bien plus efficace en terme puissance et donc de couple.

Comparé à l'autre moteur synchrone il fonctionne avec des tensions faibles, donc il est efficace pour notre réalisation. On peut utiliser 3 batteries Li-Po de 3.7V en série sa donne 11.1V en plus de sa il à :

- ▶ un couple élevé et constant,
- ▶ un coût faible,
- ▶ un échauffement limité car la résistance interne est très petite ce qui implique que les pertes joules soient faibles.

IV) Conclusion

Nous avons essayé dans ce chapitre de donner un aperçu général sur les karts électrique et nous avons présenté les différents technologies des batteries ainsi que les différents technologies des moteurs utilisée dans la conception des karts électrique. Dans le chapitre qui suit nous allons présenter en détail la machines synchrone à aimants permanents.

Chapitre 3

Machine synchrone à aimants permanents (*MSAP*)

Contents

I) Introduction	55
II) Hypothèses simplificatrices	55
III) Modélisation de la MSAP	55
III.1) Mise en équation de la MSAP en triphasé (modèle en abc)	55
III.2) Mise en équation de la MSAP en diphasé (modèle vectoriel)	58
III.3) Modélisation de la MSAP dans le repère de park	61
III.4) Mise sous forme équation d'état	62
IV) Modélisation du convertisseur DC-AC	62
IV.1) Définition de l'onduleur de tension	63
IV.2) Onduleur de tension triphasé	63
IV.3) Modélisation de l'onduleur de tension triphasé	63
IV.4) stratégie de commandes pour les onduleurs	64
V) Commande vectorielle de la MSAP	67
V.1) Principe de la commande vectorielle	68
V.2) Le découplage	69
VI) Autopilotage de la machine synchrone	70
VII) commande sans capteur mécanique	72
VII.1) Estimation basée sur les observateurs	72
VII.2) Détection de la position initiale	72
VIII) commande avec capteur mécanique	75
VIII.1) Le codeur incrémental	75
VIII.2) Le codeur incrémental utilisé	77
IX) Conclusion	79

I) Introduction

La machine synchrone est souvent présentée comme la machine qui crée les tensions du réseau de distribution, c'est l'alternateur. Cependant, le plus grand nombre de MS est celui des moteurs dits actionneurs. Elles sont donc commandées. La commande est différente suivant l'application et la structure de la MS.[17]

Les machines à aimants permanents ont connu ces dernières années un grand essor. C'est grâce à l'amélioration des qualités des aimants permanents plus précisément à l'aide des terres rares, au développement de l'électronique de puissance et à l'évolution des techniques de commande non linéaire [18]. Les atouts de ce type de machine sont multiples, parmi lesquels nous pouvons citer : robustesse, faible inertie, couple massique élevé, rendement élevé, vitesse maximale supérieure et faible coût d'entretien. Par ailleurs, les aimants permanents présentent des avantages indéniables : d'une part, le flux inducteur est créé sans pertes d'excitation et d'autre part, l'utilisation de ces matériaux va permettre de s'écarter notablement des contraintes usuelles de dimensionnement des machines et donc d'accroître la puissance massique de façon significative.

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de Rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

La structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales où trapézoïdales.



FIGURE 3.1 – Moteur synchrone à aimants permanents

Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone. Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants

II) Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

Historiquement, les premiers aimants permanents ont été utilisés au début du 19^{ème} siècle. De performances très modestes à leurs débuts, les progrès réalisés depuis plus d'un siècle ont contribué au développement des machines à aimants.

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliage métalliques ou à terres rares (par exemple du type Manioc, Samarium Cobalt, Néodyme Fer Bore, ...) leur ont permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages à savoir :

L'induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité de puissance massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines.

Dans la machine à aimants permanents **MSAP**, l'inducteur est remplacé par des aimants, le champ d'excitation peut être également créé par des aimants permanents, ceci présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotorique. La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines-outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique, ... etc.

Le domaine d'emploi de la **MSAP** à l'heure actuelle est de quelques dizaines de Kilo Watts à cause des caractéristiques magnétiques des aimants qui peuvent se perdre en dépassant les limites de fonctionnement.

L'ensemble de ces propriétés leur donnent un avantage incontestable dans la motorisation d'actionneurs de forte puissance massique et de hautes performances, notamment dans les systèmes embarqués.

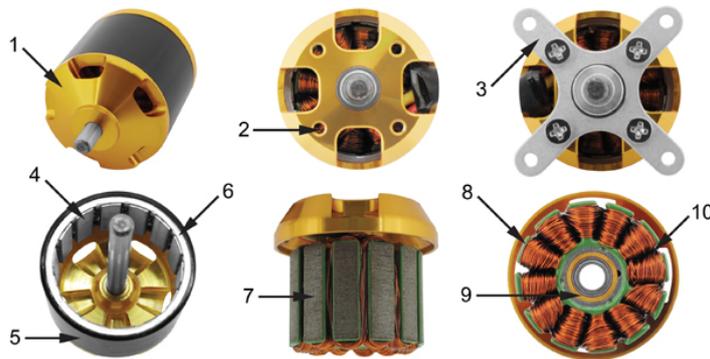


FIGURE 3.2 – Moteur brushless.

II.1) Structure

Le moteur synchrone est constitué de deux parties, une partie mobile où rotor constituant l'inducteur, et une partie fixe ou stator portant des enroulements constituant l'induit. La mince zone localisée entre ces deux éléments est appelée entrefer.

Le stator d'une machine synchrone triphasé est constitué de trois enroulements identiques décalés de 120° dans l'espace, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer.

Il est généralement construit en tôle à base d'alliage Fer Silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée. Au rotor, les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternant pôles Nord et pôles Sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f.é.m.) alternatives. L'interaction des champs statorique et rotorique donne naissance à un couple sur l'arbre du moteur et entraîne le moteur à vitesse de rotation synchrone. La figure suivante, présente une machine synchrone à aimants en surface.

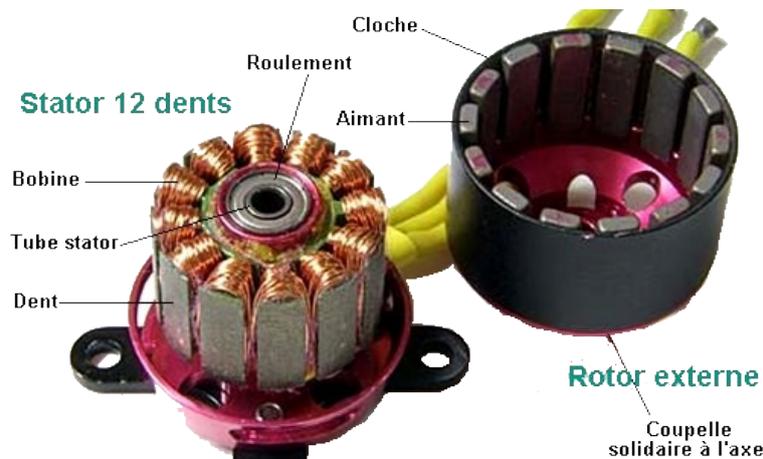


FIGURE 3.3 – Moteur brushless à basse tension

II.2) Aimants permanents

Le choix des aimants permanents est essentiel puisqu'ils interviennent pour beaucoup dans le couple massique d'un actionneur. Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan B-H. (figure 3.4)

Cette courbe est caractérisée par :

- L'induction rémanente B_r , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé.
- Le champ coercitif de l'induction H_{cb} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable.
- Les valeurs H_m et B_m du point de fonctionnement optimal M correspondant à $(BH)_{max}$.

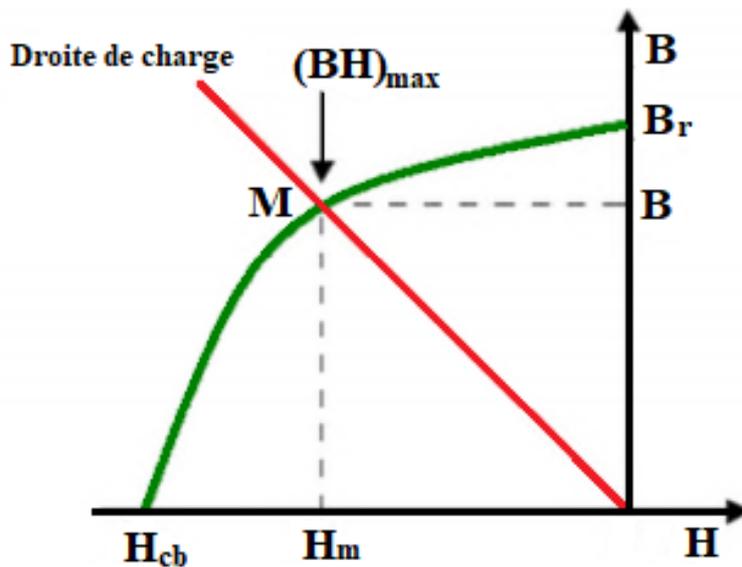


FIGURE 3.4 – Courbe de désaimantation

On peut classer les différents types d'aimants en fonction de ces paramètres. La figure(3.5) donne les courbes de désaimantation des principaux types d'aimants.

- Les AlNiCo sont des alliages à base de fer, d'aluminium et de nickel, avec des additions de cobalt, cuivre ou de titane. Ils peuvent être isotropes ou anisotropes.
- Les ferrites sont des composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Ils sont obtenus par frittage et peuvent être isotropes ou anisotropes.
- Les terres rares tels que les Samarium Cobalt sont beaucoup plus performants et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 300°C), mais ils sont très coûteux en raison notamment de la présence du Cobalt dans leur composition.
- Les Néodyme Fer Bore (Nd-Fe-B) ont des performances supérieures aux Samarium Cobalt et sont beaucoup moins coûteux mais leur tenue à la température est moins bonne jusqu'à (160°C).

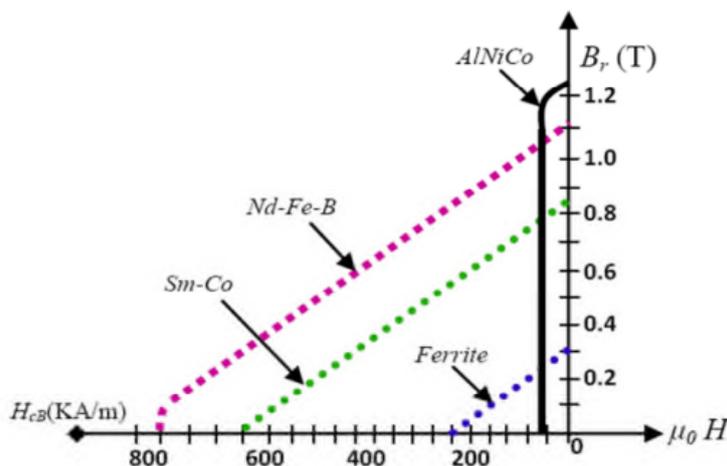


FIGURE 3.5 – Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants

Le choix des aimants permanents dépend des facteurs suivants :

- Performance du moteur,
- Poids du moteur,
- Dimension du moteur,
- Rendement du moteur,
- Facteur économique.

II.3) Types de rotor d'une MSAP

Les moteurs synchrones sont classés en trois types d'après l'arrangement des aimants dans le rotor **Figure (3.2)** :

- Le moteur synchrone à aimants collés (**SPMSM**, Surface Permanent Magnet Synchronous Motors).
- Le moteur synchrone à aimants enterrés (**IPMSM**, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor).
- Le moteur synchrone à concentration du flux (**SynRM** Synchronous Reluctance Motor).

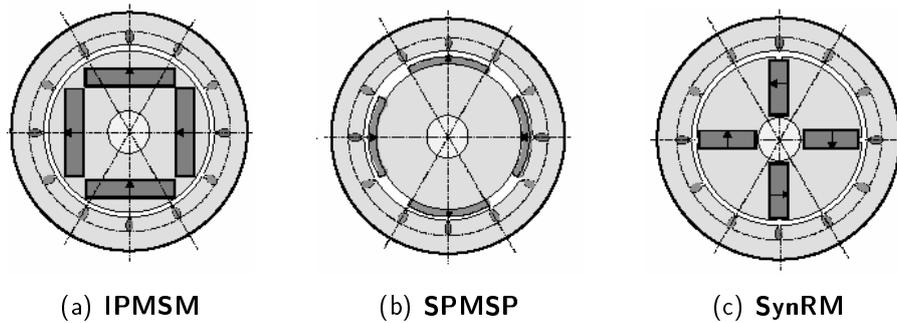


FIGURE 3.6 – Les trois types de rotor du moteur synchrone.

III) Couple des machines synchrones à aimants permanents

On distingue trois types de couple :

- **Couple de détente :**

Quand les aimants tournent avec le rotor et passent devant les dents du stator, ils rencontrent une reluctance variable qui entraîne un couple de valeur moyenne nulle que l'on appelle couple de détente ; pour tenter de l'annuler, les encoches peuvent être inclinées d'un pas d'encoche, mais cela rend plus difficile l'opération de bobinage, il est préférable d'incliner les aimants plutôt que les encoches.

- **Couple reluctance :**

Appelé aussi couple de saillance, il est dû aux variations des inductances des enroulements

statoriques en fonction de la position du rotor. Il faut noter que dans le cas des aimants montés en surface, le flux d'induit rencontre la même réluctance quelle que soit la position du rotor, il n'y a pas donc pour ces moteurs de couple de réluctance à prendre en compte.

- **Couple mutuelle :**

Il est dû à l'interaction des deux champs statorique et rotorique.

IV) Avantages et Inconvénients des *MSAP*

IV.1) Avantages des *MSAP*

Lors de la construction des machines synchrones à aimants permanents (**MSAP**), à la place des bobinages d'excitation offrent beaucoup d'avantages :

- Moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator d'où le rendement du moteur est améliorées,
- Une faible inertie et un couple massique élevé,
- Une meilleure performance dynamique,
- Construction et maintenance plus simple,
- Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contact bague balais dans ces machines.

IV.2) Inconvénients des *MSAP*

Commutateur mécanique remplacé par un autre dispositif électronique, ce qui a pour effet de rendre le contrôle du moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu.

- Le prix des aimants le rend plus cher,
- La présence de pulsation de couple,
- Risque de désaimantation, ce qui limite l'utilisation par les des contrainte comme la température max, courant max... et,
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants.

V) Comparaison entre la *MSAP* et les autres machines électriques

Le tableau suivant montre, les caractéristiques des différentes machines qui sont comparées à celles de la *MSAP*.

1. MSAP.

CARACTERISTIQUES

Machine synchrone à aimants permanents.

- 1.1 Excitation assurée par les aimants,
- 1.2 Pertes associées à la composante magnétisante négligeable,
- 1.3 Possibilité de fonctionnements à des facteurs de puissance élevés,
- 1.4 Dégradation des performances avec l'augmentation de la température,
- 1.5 Possibilité démagnétisation des aimants (température, pic de courant, défluxage...),
- 1.6 Assemblages aimants,
- 1.7 Coût.

2. Machine synchrone conventionnelle

- 2.1 Exige une alimentation auxiliaire à CC pour alimenter le circuit d'excitation,
- 2.2 Faible couple volumique,
- 2.3 Mauvais η global,
- 2.4 Pertes Joules au rotor difficiles à évacuer,
- 2.5 Robuste, mais commande très complexe,
- 2.6 Faible coût de réalisation, et aussi l'ondulation de couple.

3. Machine à courant continu

- 3.1 Alimentation continue supplémentaire,
- 3.2 Présence des contacts tournants,
- 3.3 Maintenance régulière des balais,
- 3.4 Manque robustesse,
- 3.5 Grandes pertes dans l'inducteur,
- 3.6 Limitation en vitesse.

VI) Domaines d'application des moteurs synchrones

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance allant de quelques centaines de watts (servomoteurs) à plusieurs MEGA watts (systèmes de propulsion des navires). Dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation, l'entraînement à vitesse variable, et la traction.

- Il fonctionne comme compensateur synchrone,
- Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges.

VII) Conclusion

Suite à la comparaison des machines synchrones à aimants permanents avec les autres types de machines nous pouvons confirmer que la machine à aimants permanents aura un avenir très intéressant surtout avec l'apparition des aimants à haute performance.

On a présenté dans ce chapitre la machine synchrone à aimants permanents, les généralités du MSAP, Ainsi nous avons mis en évidence les avantages, et les domaines d'application du MSAP, et aussi les caractéristiques des Aimants permanents.

Le chapitre suivant a pour objectif de faire la modélisation du MSAP, et du convertisseur l'onduleur, et la commande vectorielle de la MSAP, ainsi la commande avec et sans codeur incrémental.

Chapitre 4

Modélisation et commande vectorielle de la *MSAP*

Contents

I)	Introduction	81
II)	Conception de kart électrique	81
III)	Partie mécanique "étapes de conception du kart électrique"	82
III.1)	Description des différentes étapes de conception :	82
III.2)	Réalisation du châssis et la suspension	84
IV)	Partie électrique et électronique "Hardware"	94
IV.1)	Carte électronique Launchpad XL F28069M	94
IV.2)	BOOSTXL-DRV8305EVM	99
V)	Partie Software	101
V.1)	Code Composer Studio	101
V.2)	Bibliothèque MotorWare™	102
V.3)	Module de MotorWare™ Hardware Abstraction Layer (HAL)	104
V.4)	Logiciel MotorControl (SDK) pour MCU C2000™	108
VI)	Partie Contrôle "Programme"	109
VI.1)	Norme de codage	109
VI.2)	Aperçu Notre Lab Projects	112
VI.3)	Partie Sans Codeur Incrémentale " Sensorless " :	113
VI.4)	Partie avec codeur incrémentale "moteur1, Sensored " :	124
VII)	Conclusion	134

I) Introduction

Grâce aux développements des semi-conducteurs de puissance, les moteurs à courant alternatif sont de plus en plus utilisés dans le domaine industriel. Les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) peuvent concurrencer avec les moteurs à courant continu dans la variation de vitesse, car la commutation est réalisée électriquement et à l'extérieur du moteur. Les nouvelles applications industrielles nécessitent des variateurs de vitesse ayant des hautes performances dynamiques. Ces dernières années plusieurs techniques ont été développées pour permettre aux variateurs synchrones à aimants permanents d'atteindre ces performances. En 1971, BLASCHKE et HASS ont proposé une nouvelle théorie de commande par orientation du champ où le vecteur courant statorique sera décomposé en deux composantes l'une assure le contrôle de flux et l'autre agit sur le couple et rend sa dynamique identique à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. [19], Cette technique est connue sous le nom de la commande vectorielle.

II) Hypothèses simplificatrices

Avant d'établir le modèle mathématique nous devons nous imposer quelques Hypothèses :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- Le moteur possède une armature symétrique non saturée, les inductances propre et mutuelle sont indépendants des courants qui circulent dans les différents enroulements.
- La distribution des forces électromotrices, le long de l'entrefer, est supposée Sinusoïdale.
- Les pertes fer sont négligés.
- La perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air.

III) Modélisation de la MSAP

III.1) Mise en équation de la MSAP en triphasé (modèle en abc)

III.1.1) a) Equations électriques

Les tensions, flux et courants statoriques triphasés, sont écrits avec les notations vectorielles suivantes respectivement : $[V_s]$, $[\phi_s]$ et $[i_s]$.

La figure 4.1 représente les enroulements d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents [20]

A partir de la figure 4.1, nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère fixe au stator, en notation matricielle : [21] [20]

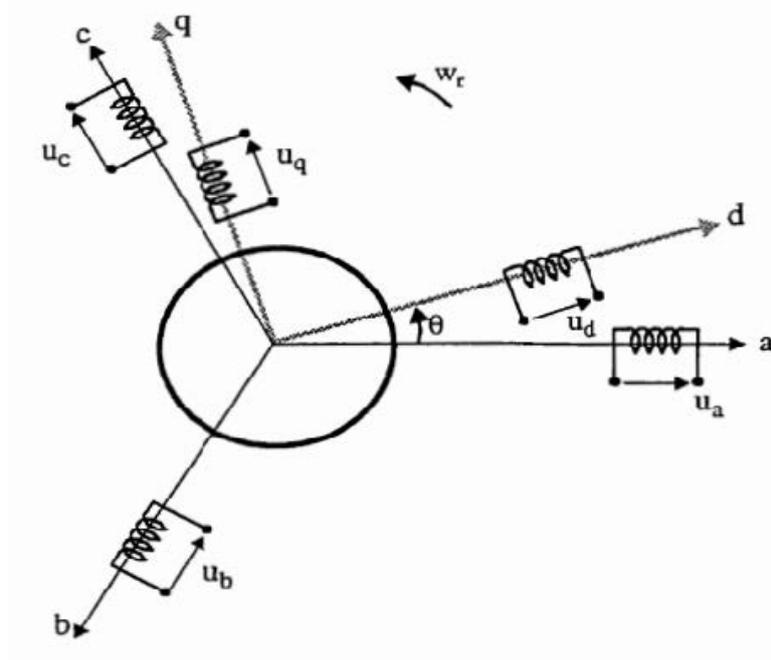


FIGURE 4.1 – Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère triphasé

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (4.1)$$

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][i_s] + [\varphi_{sf}] \quad (4.2)$$

$$\text{d'où } [L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{sv}]$$

avec :

$[V_s] = [V_a V_b V_c]^T$: Vecteur tensions statoriques,

$[i_s] = [i_a i_b i_c]^T$: Vecteur courants statoriques,

$[\varphi_s] = [\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^T$: Vecteur flux statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice résistances du stator,}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} : \text{Matrice inductance du stator,}$$

$$[\varphi_s] = \varphi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} : \text{Vecteur flux engendré par l'aimant.}$$

avec :

φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant à travers les enroulements statoriques.

θ : Angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé défini par :

$$\theta(t) = \int_0^t \omega d(\tau) \quad (4.3)$$

avec :

$$\omega = p\omega_r \quad (4.4)$$

ω : pulsation électrique,

P : Le nombre de paire de pôles de la machine,

ω_r : vitesse de rotation de la machine.

Le modèle électrique doit être complété par les expressions du couple électromagnétique et de la vitesse, décrivant ainsi le mode mécanique.

III.1.2) b) Equation électromagnétique

Pour l'étude de la machine et sa commande, la connaissance du couple électromagnétique de la machine est essentielle.

$$C_{em} = [i_s]^T \left[\frac{1}{2} \frac{d[L_s]}{d\theta} \right] [i_s] + \frac{1}{2} \frac{d[\varphi_{sf}]}{d\theta} \quad (4.5)$$

III.1.3) c) Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \omega_r \quad (4.6)$$

avec :

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par le moteur,

C_r : Couple résistant,

f : Coefficient de frottement,

J : Moment d'inertie du moteur.

III.2) Mise en équation de la MSAP en diphasé (modèle vectoriel)

III.2.1) Principe de la transformation de park

Le modèle diphasé de la MSAP s'effectue par une transformation du repère triphasé réel en un repère biphasé fictif, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux, et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle θ et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de Park. [22] , [23] , [20]

Le repère (d,q) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant, Selon l'objectif de l'application.

La figure 4.2 présente la MSAP en modèle vectoriel (modèle de Park) :

Le repère (oa) est fixe. Le repère (d,q) tourne avec la vitesse de synchronisme.

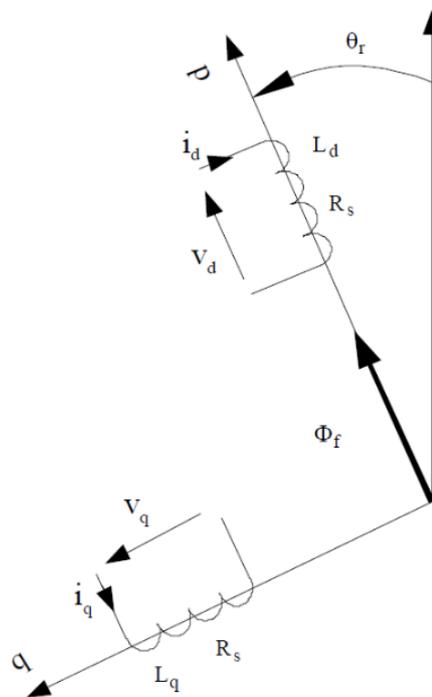


FIGURE 4.2 – Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q)

III.2.2) a) Passage direct : du triphasé au diphasé

L'équation de passage du système triphasé (a,b,c) au système biphasé (d,q) est donnée par :

$$[X_{dq0}] = P(\theta) \cdot [X_{abc}]^T \quad (4.7)$$

avec :

$P(\theta)$: La matrice de passage direct de Park.

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Où : X représente les variables considérées de la machine qui sont tensions, courants ou flux.

$$[V_{dq0}] = P(\theta) \cdot [V_{abc}]^T \quad (4.9)$$

$$[i_{dq0}] = P(\theta) \cdot [i_{abc}]^T \quad (4.10)$$

$$[\varphi_{dq0}] = P(\theta) \cdot [\varphi_{abc}]^T \quad (4.11)$$

X_0 : La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est en équilibre.

III.2.3) b) Passage inverse : du diphasé au triphasé

La transformée de Park inverse est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées, elle est définie par :

$$[X_{abc}] = P(\theta)^{-1} [X_{dq0}] \quad (4.12)$$

La matrice de passage inverse de Park $P(\theta)^{-1}$ est donnée par :

$$P^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

III.2.4) Principe de la transformation de concordia

La transformation directe de CONCORDIA est déterminée par la matrice [C], qui relie entre les vecteurs des axes (a,b,c) aux vecteurs des axes ($\alpha, \beta, 0$), elle est appliquée aux tensions, aux courants,

et aux flux, $[V_{abc}]$, $[i_{abc}]$, $[\varphi_{abc}]$ aux $[V_{\alpha\beta 0}]$, $[i_{\alpha\beta 0}]$, $[\varphi_{\alpha\beta 0}]$ respectivement.

Le vecteur X_0 , représente la composante homopolaire.

III.2.5) a) Passage direct : du triphasé au diphasé

Si on pose $0 = O$ dans les équations (4.8) et (4.13), les matrices de PARK deviennent les matrices de CONCORDIA :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Avec :

X_α, X_β : Représentent les vecteurs diphasés qui correspondent aux vecteurs X_a, X_b et X_c . $[C]$:

La Matrice direct de CONCORDIA, donnée par (4.15) :

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

III.2.6) b) Passage inverse : du diphasé au triphasé

Le passage inverse de la transformation de CONCORDIA est défini par les relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [C]^{-1} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

avec : $[C]^{-1}$ La matrice inverse de CONCORDIA

$$[C]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

On a choisi le coefficient pour les matrices de PARK et CONCORDIA afin de conserver la puissance pendant le passage entre les deux référentiels

III.2.7) Passage du repère (d, q) au repère (α, β)

Le passage des composantes (α, β) aux composantes (d, q) est donné par une Matrice de rotation exprimée par :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Avec :

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

[R] : Matrice de passage (d, q) au (α, β).

III.3) Modélisation de la MSAP dans le repère de park

III.3.1) a) Equation électrique

Le modèle de la machine après la transformation de Park est donné par :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - p\omega_r \varphi_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + p\omega_r \varphi_d \end{cases} \quad (4.20)$$

D'après la relation (4.20), on a le couplage entre les axes « d » et « q ». Expressions des flux :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + \varphi_{sf} \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (4.21)$$

L_d, L_q : Inductances d'axes directe et en quadrature.

III.3.2) b) Equations électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé dans le repère (d, q) par l'expression suivante :

$$C_{em} = p \cdot [(L_d - L_q) I_d I_q + \varphi_{sf} \cdot I_q] \quad (4.22)$$

III.3.3) c) Equations mécaniques

L'équation mécanique de la machine est donnée par la relation suivante :

$$j \frac{d\omega_r}{dt} + f \cdot \omega_r = C_{em} - C_r \quad (4.23)$$

Avec :

- j : Moment d'inertie de la partie tournante (kg.m^2),
- f : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad),
- C_r : Couple résistant (N.m),
- ω_r : Vitesse mécanique (rad/s).

III.4) Mise sous forme équation d'état

Considérons les tensions (V_d, V_q) et le flux d'excitation φ_{sf} comme grandeurs de commande, les courants statoriques (I_d, I_q) comme variables d'état. A partir des équations (4.20), (4.21), on peut écrire le système d'équations comme suit : [24], [20]

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (4.24)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & P\omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -P\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Dans le cas d'une régulation de la position θ du rotor, il faut prendre celle-ci comme une nouvelle variable d'état et donc le nouveau modèle d'état s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & P\omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -P\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} P\omega_r i_q \\ -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} P\omega_r i_d - \frac{\varphi_{sf}}{L_q} P\omega_r \\ \frac{\varphi_{sf}}{J} P i_q - \frac{(L_q - L_d)}{J} P i_q i_d - \frac{f}{J} \omega_r \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ C_r \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$\frac{d[X]}{dt}$: Vecteur de dynamique du système,

$[A]$: Matrice d'état,

$[X]$: Vecteur d'état (avec $[X] = [i_d \ i_q \ \omega_r]^T$),

$[B]$: Matrice d'entrée,

$[U]$: Vecteur de commande (avec $[U] = [V_d \ V_q \ \varphi_{sf}]^T$).

IV) Modélisation du convertisseur DC-AC

L'onduleur de nos jours très largement utilisés dans les systèmes d'entraînement industriels, en premier lieu, les progrès en matière de semi-conducteur ont permis la réalisation de convertisseurs

statiques de plus en plus performants. En second lieu, l'évolution des techniques numériques et de commandes. On distingue plusieurs types d'onduleurs :

- Selon la source :
 - onduleurs de tension,
 - onduleurs de courant.
- Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc.),
- Selon le nombre de niveaux (2,3, etc.) [21].

IV.1) Définition de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique d'aujourd'hui. L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple alimenter un système alternatif à partir d'une batterie dans les alimentations de secours pour éviter les micro-coupures et dans la conversion des systèmes d'énergie renouvelable (PV, turbine éolienne), ou à fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse des machines électriques.

L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir du réseau.

IV.2) Onduleur de tension triphasé

L'onduleur de tension triphasé est constitué de trois bras formés d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement selon la puissance et la fréquence de travail, chaque bras compte deux composants de puissance complémentaires (Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif) munis de diode montée en anti-parallèle. Les diodes à roue libres assurent la continuité du courant dans la Machine une fois les interrupteurs sont ouverts. [25]

Pour le système triphasé, il existe deux types d'onduleur :

- * le premier est formé par trois demi – ponts monophasés à diviseur capacitif qui est utilisé particulièrement pour une charge déséquilibrée,
- * Le deuxième est l'onduleur en pont qui est très utilisé et particulièrement pour des charges équilibrées et qui sont très fréquentes. Il ressemble à un redresseur triphasé parallèle double ou double alternance.

IV.3) Modélisation de l'onduleur de tension triphasé

L'onduleur de tension qui alimente la MSAP peut être idéalement représenté selon la figure :

T_i et T'_i avec $i = (a, b, c)$ sont des transistors MOSFET. i et i' sont les commandes logiques qui leur sont associées telle que :

- si $i = 1$ l'interrupteur T_i est passant et T'_i est ouvert.

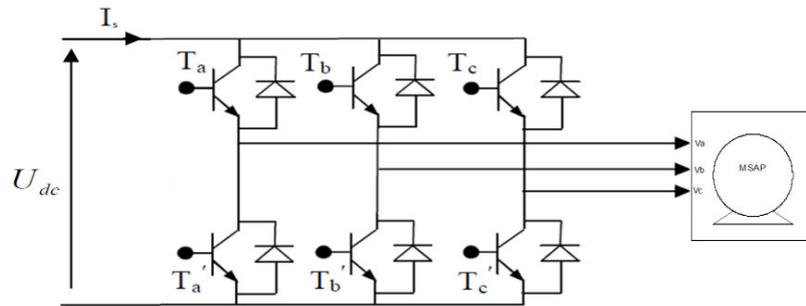


FIGURE 4.3 – Schéma de l'association onduleur – MSAP.

— si $i = 0$ l'interrupteur T_i est ouvert et T'_i est passant.

IV.4) stratégie de commandes pour les onduleurs

Pour la commande de l'onduleur, il existe plusieurs stratégies, parmi lesquelles on distingue les stratégies de commande suivante :

- commande pleine onde (dite 180°).
- Commande décalée.
- La commande des régulateurs de courant qui génèrent directement les signaux de commande de l'onduleur : c'est la stratégie ON/OFF(hystérésis).
- La commande des régulateurs de courants qui fournissent des références de tension à appliquer par l'onduleur et son système de commande par MLI (Modulation de Largeur et d'Impulsion).

La tension générée par les stratégies (a, b) à une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier à montrer que cette forme d'onde est riche en harmoniques d'ordre $k=6n\pm 1$, avec k entier.

IV.4.1) a) Principe de la commande MLI

Dans notre travail, l'onduleur est commandé par la technique (MLI) générée par une porteuse sous forme de dent de scie, La technique MLI appelée en anglais (Pulse Width Modulation PWM). Elle est utilisée pour générer un signal qui contrôle les interrupteurs, la MLI délivre un signal de commande en créneaux, il est généré par l'intersection de deux signaux, signal de référence, généralement sinusoïdale qui est de basse fréquence, et le signal de porteuse qui est de haute fréquence de forme généralement triangulaire d'où L'appellation triangulo-sinusoïdale.

IV.4.2) b) Caractéristique de la MLI

Deux paramètres caractérisent cette commande :

$$1)m = \frac{f_p}{f_r} \quad (4.27)$$

$$2)r = \frac{V_r}{V_p} \quad (4.28)$$

avec :

m : L'indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence

r : Le taux de modulation (ou coefficient de réglage) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse

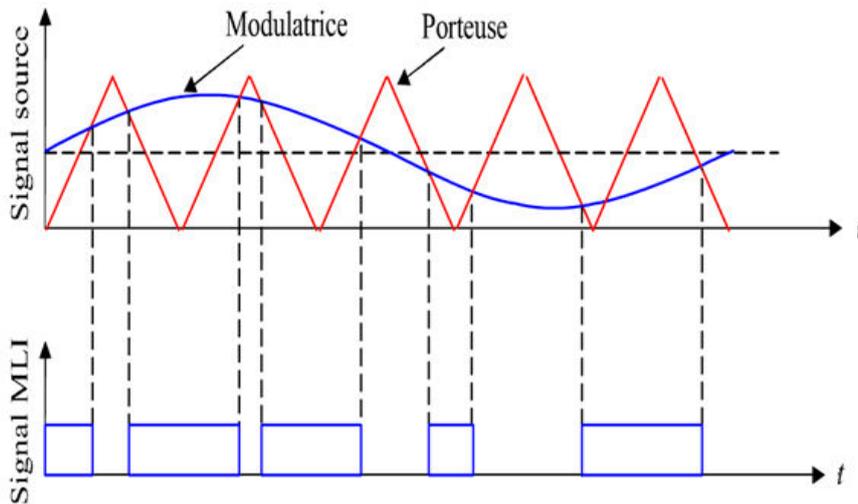


FIGURE 4.4 – Principe de la commande MLI

On considère l'alimentation de l'onduleur comme une source parfaite, supposée être constituée par deux générateurs de f.é.m. égale à $\frac{E}{2}$ connectés entre eux par un point commun (0).

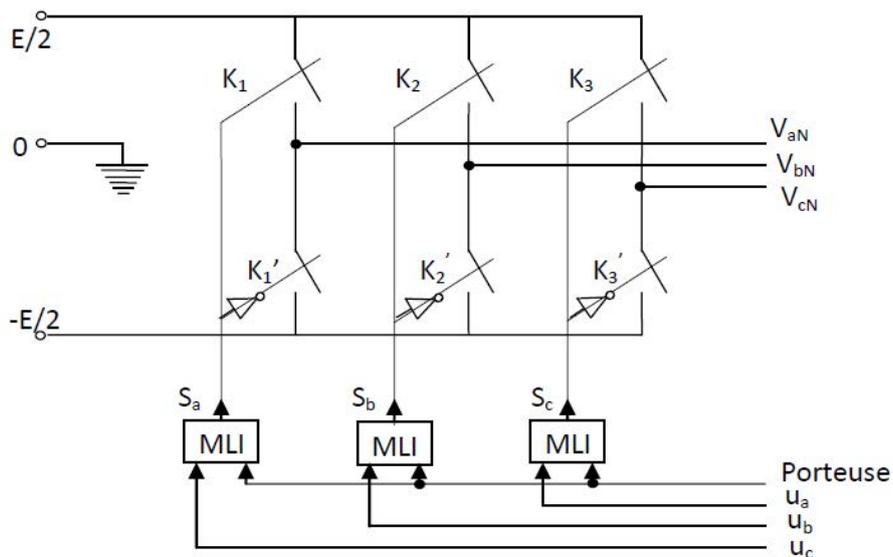


FIGURE 4.5 – Schéma équivalent de l'onduleur à MLI

Les tensions aux bornes de l'onduleur :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \quad (4.29)$$

Les tensions V_{aN} , V_{bN} et V_{cN} forment un système de tension triphasé équilibré, donc :

$$V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} = 0 \quad (4.30)$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{aN} = V_{a0} + V_{0N} \\ V_{bN} = V_{b0} + V_{0N} \\ V_{cN} = V_{c0} + V_{0N} \end{array} \right\} \implies V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} = 3V_{0N} + V_{a0} + V_{b0} + V_{c0} = 0 \quad (4.31)$$

de (4.31) on déduit :

$$V_{0N} = -\frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (4.32)$$

A partir de l'équation (4.31) et (4.32), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Dans une branche d'onduleur, un interrupteur statique (k) peut prendre la valeur +1 ou 0 selon les conditions suivantes :

$$V_{aref} \geq V_p \implies S_a = 1 \quad \text{sinon} \quad S_a = 0$$

$$V_{bref} \geq V_p \implies S_b = 1 \quad \text{sinon} \quad S_b = 0$$

$$V_{cref} \geq V_p \implies S_c = 1 \quad \text{sinon} \quad S_c = 0$$

avec :

V_{ref} : Amplitude de référence.

V_p : amplitude de porteuse.

Et les branches V_{k0} peuvent être exprimées en fonction des switches « S_k » par :

$$V_{k0} = S_k \left(\frac{E}{2} \right) \text{ avec } k = (a, b \text{ et } c)$$

donc :

$$\begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

(4.34) matrice de connexion.

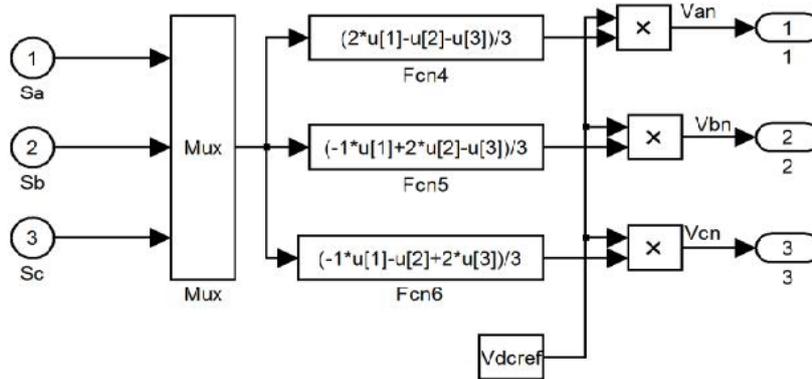


FIGURE 4.6 – Modèle de l'onduleur sur Simulink

V) Commande vectorielle de la MSAP

La commande des moteurs à courant alternatif est de plus en plus utilisée dans les applications industrielles. Grâce aux développements des semi-conducteurs de puissance ; les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) sont capables de concurrencer les moteurs à courant continu dans la variation de vitesse, car la commutation est réalisée électriquement et à l'extérieur du moteur.

Les nouvelles applications industrielles nécessitent des variateurs de vitesse ayant des hautes performances dynamiques. Ces dernières années plusieurs techniques ont été développées pour permettre aux variateurs synchrones à aimants permanents d'atteindre ces performances.

En 1971, BLASCHKE et HASS ont proposé une nouvelle théorie de commande par orientation du champ où le vecteur courant statorique sera décomposé en deux composantes l'une assure le contrôle de flux et l'autre agit sur le couple et rend sa dynamique identique à celle de la machine à courant continu a excitation séparée.

Cette technique est connue sous le nom de la commande vectorielle.

Après avoir étudié la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) et suite à sa simulation, nous présentons dans ce chapitre la commande vectorielle de la MSAP alimentée par un onduleur de tension. La stratégie de commande de l'onduleur est contrôlée par la technique MLI, La simulation est réalisée grâce au logiciel MATLAB/Simulink.

V.1) Principe de la commande vectorielle

En analysant le système d'équations (2.23) l'équation du couple, nous pouvons relever que le modèle est non linéaire et il est couplé. En effet, le couple électromagnétique dépend à la fois des grandeurs I_d et I_q .

L'objectif de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, c'est à dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique.

Plusieurs stratégies existent pour la commande vectorielle des machines à aimants permanents, la commande par flux orienté est une expression qui apparait de nos jours dans la littérature traitent les techniques de contrôle des moteurs électriques, cette stratégie consiste à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation comme cela est le cas dans une machine a courant continu.

Puisque le principal flux de la MSAP est généré par les aimants du rotor, la solution là plus simple pour une machine synchrone à aimants permanents est de maintenir le courant statorique en quadrature avec le flux rotorique (le courant direct I_d nul et le courant en quadrature à la seule composante I_q : $(I_s = I_q)$ qui donne un couple maximal contrôlé par une seule composante du courant (I_q) et de réguler la vitesse par le courant traverse I_q via la tension V_q . Ceci vérifie le principe de la machine à courant continu.

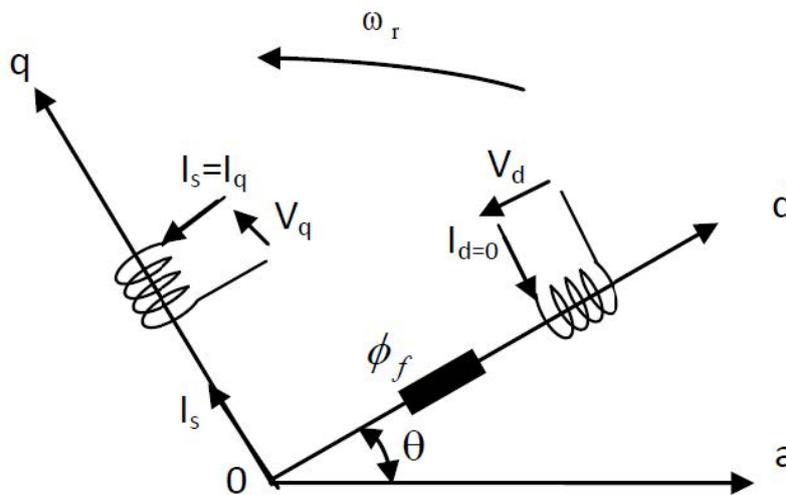


FIGURE 4.7 – Principe de la commande vectorielle

Notons aussi que l'annulation de I_d provoque une réduction du courant statorique.

Pour $I_d = 0$, le système d'équations de la MSAP sera réduit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = -p\omega_r L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + p\omega_r \varphi_f \end{cases} \quad (4.35)$$

$$\begin{cases} C_{em} = p\phi f I_q \\ C_{em} - C_r = J \frac{d\omega_r}{dt} + f\omega_r \end{cases} \quad (4.36)$$

On remarque que cette stratégie permet d'éliminer le problème de couplage entre les axes (d,q). Lorsque le courant I_d est nul, le modèle de la MSAP est réduit au modèle équivalent à la machine à courant continu à excitation séparée comme le montre la figure :

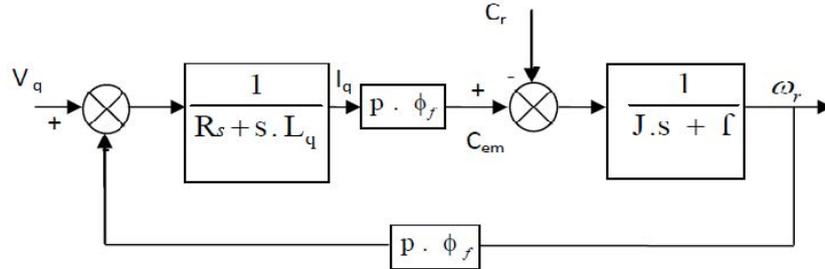


FIGURE 4.8 – Modèle de MSAP commandé avec flux orienté et I_d nul

V.2) Le découplage

Le modèle de la MSAP dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre, ils sont reliés par des termes ou des coefficients non linéaires $\omega_r i_q$; $\omega_r i_d$.

$$\begin{cases} V_d = (R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt}) - \omega L_q I_q \\ V_q = (R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt}) + \omega (L_d I_d + \phi f) \\ \omega = p\omega_r \end{cases} \quad (4.37)$$

La figure 4.9 représente le couplage entre les axes « d » et « q »

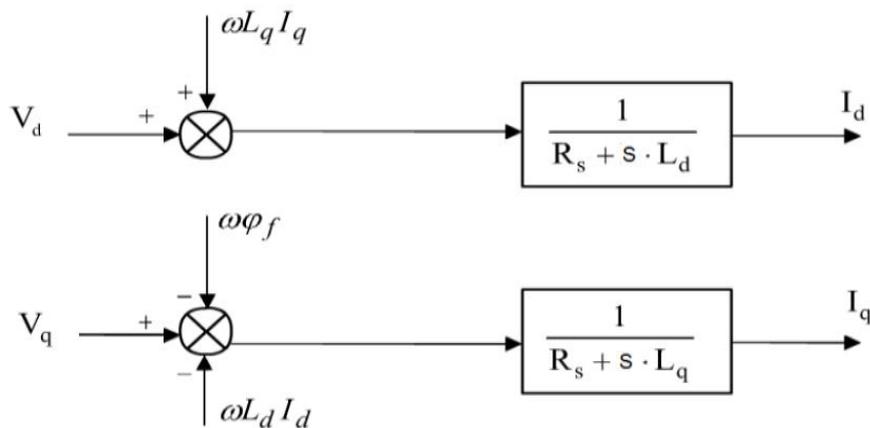


FIGURE 4.9 – Couplage entre les axes « d » et « q »

V.2.1) Découplage par compensation

La compensation a pour but de découpler les axes d et q. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs. [an 10] Les tensions V_d et V_q dépendent à la fois des courants sur les axes «d» et «q», on est donc amené à implanter un découplage. Ce découplage est basé sur l'introduction des termes compensatoires F_{emd}, F_{emq} telle que :

$$\begin{cases} F_{emd} = -\omega L_q I_q \\ F_{emq} = \omega(L_d I_d + \varphi f) \end{cases} \quad (4.38)$$

À partir de (4.37) et (4.38) on obtient :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - F_{emd} \\ V_q = V_{q1} - F_{emq} \end{cases} \quad (4.39)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d)I_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q)I_q \end{cases} \quad (4.40)$$

On obtient donc des courants I_d et I_q découplés. Ils sont donc Independent. Le courant I_d ne dépend que de V_{d1} , et I_q ne dépend que V_{q1} , à partir de l'équation (4.40) les expressions des courant I_d et I_q s'écrivent :

$$\begin{cases} I_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ I_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (4.41)$$

D'où : (s) est l'opérateur de Laplace

Le principe de régulation consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par les régulateurs classiques.

La figure 4.10 représente Le schéma de principe de régulation des courants statoriques

Schéma global de la commande vectorielle de la Machine Synchrone à aimants permanents.

VI) Autopilotage de la machine synchrone

Ce type de commande est utilisé pour les machines synchrones particulière qui ont la forme d'onde de la force électromotrice sinusoïdale

Cette commande est basé sur la commutation entre les bobines du stator alimenté séquentiellement, générant ainsi un champ électrique tournant qui entraîne le rotor avec lui.

Chaque étape de la séquence de commutation implique l'alimentation de l'un des enroulements avec une tension positive, celle d'un deuxième avec une tension négative, le troisième étant laissé ouvert.

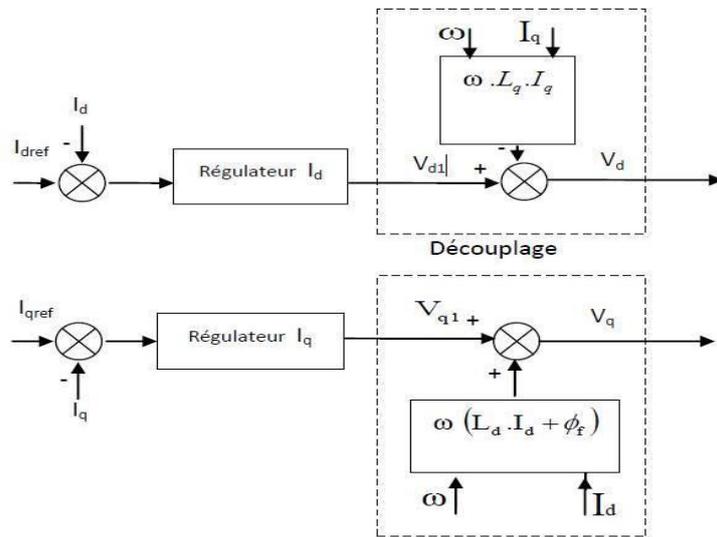


FIGURE 4.10 – Principe du découplage par compensation

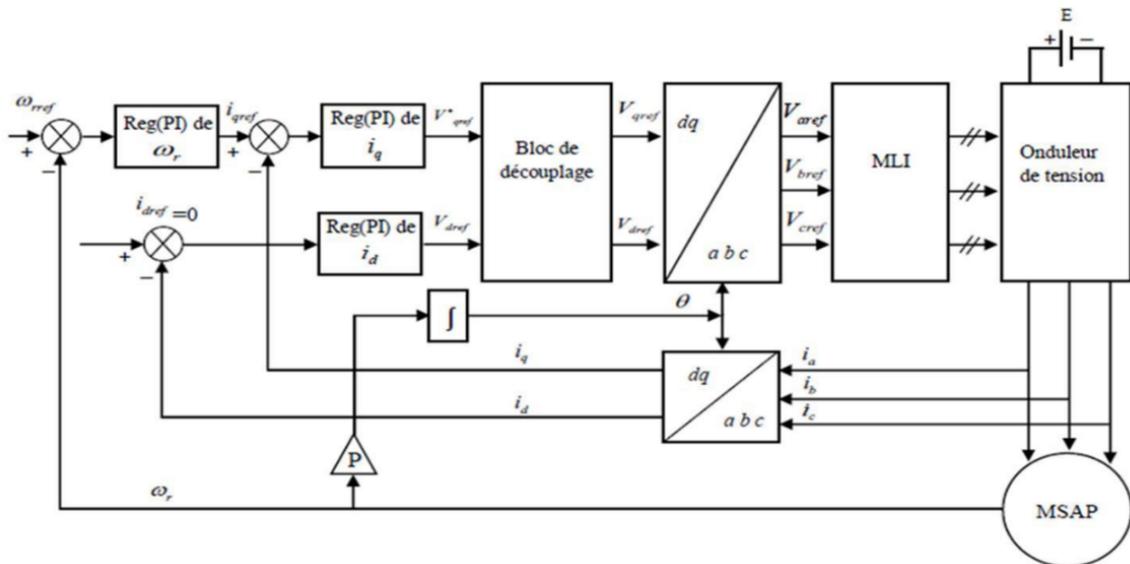


FIGURE 4.11 – Schéma global de la commande vectorielle MSAP

Pour terminer un cycle électrique on doit faire six étapes de la séquence de commutation. Pour garantir un fonctionnement efficace, il faut veiller à ce que les bobines soient alimentées exactement au bon moment. pour cela on peut utilisé des capteurs à effet Hall qui change d'état on fonction du champ magnétique fourni par une des trois bobines, et donc on peut déterminé quelles bobines alimentées par la suite.

Avec la variante sans capteur du moteur, il n'y a pas de capteurs à effet Hall. Au lieu de cela, lorsque le moteur tourne, la force contre-électromotrice dans les trois bobines varie selon une forme d'onde trapézoïdale, représentée à la figure 4.13. le passage à zéro de la forme d'onde de la f.e.m pour les bobines permet de déterminer la séquence d'alimentation de la bobine.

D'après la figure 4.12 et la figure 4.13. on remarque qu'il existe une différence de phase entre la variation de sortie du capteur à effet Hall et le point de passage à zéro de la force contre-électromotrice de 30 degrés. Par conséquent, dans un circuit de commande de moteur sans capteur, une fois que le point de passage à zéro a été détecté, un retard de phase de 30 degrés est intégré

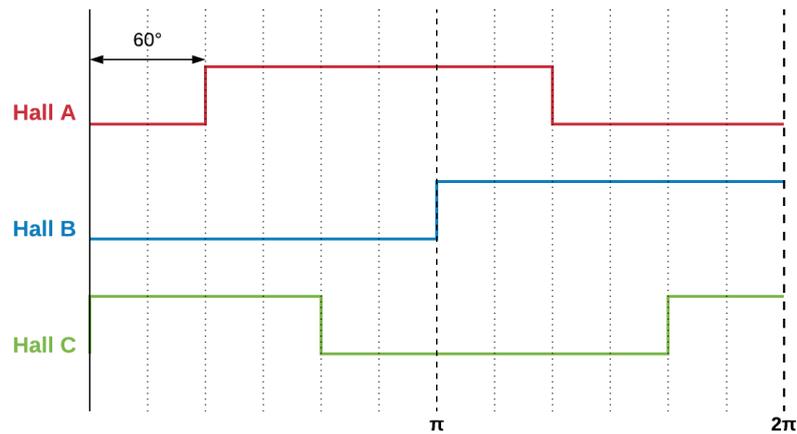


FIGURE 4.12 – Changement d'état de la sortie du capteur à effet Hall

avant l'activation de l'action suivante de la séquence d'alimentation.

Dans la figure 4.13, les lignes en pointillés courts indiquent la f.e.m le courant dans les bobines.

VII) commande sans capteur mécanique

Actuellement plusieurs travaux ont été effectués sur cette commande de la MSAP. La totalité des techniques récentes et les plus utilisées dans ce domaine. Il est possible de les classer sous les catégories suivantes :

- Les observateurs [26], [18],
- Estimation de la position du rotor par l'injection d'un signal à haute fréquence [27].
- Commande DTC [28].

VII.1) Estimation basée sur les observateurs

Plusieurs approches de la commande sans capteur mécanique de la MSAP basée sur les observateurs d'états ont été proposées. Nous distinguons les catégories suivantes : [26], [18],

- le filtre de Kalman,
- l'observateur de Luenberger,
- les Systèmes Adaptatifs avec Modèle de Référence (MRAS),
- l'observateur de Matsui,
- les observateurs non linéaires tels que les observateurs par modes glissants.

VII.2) Détection de la position initiale

Pour la détection de la position initiale du rotor des MSAP, différentes méthodes ont été développées pouvant être mises en œuvre, Toutes ces méthodes permettent de générer une information pertinente pour l'élaboration des indicateurs pour la détection de la position initiale du rotor. Ces techniques peuvent être classées en quatre groupes :

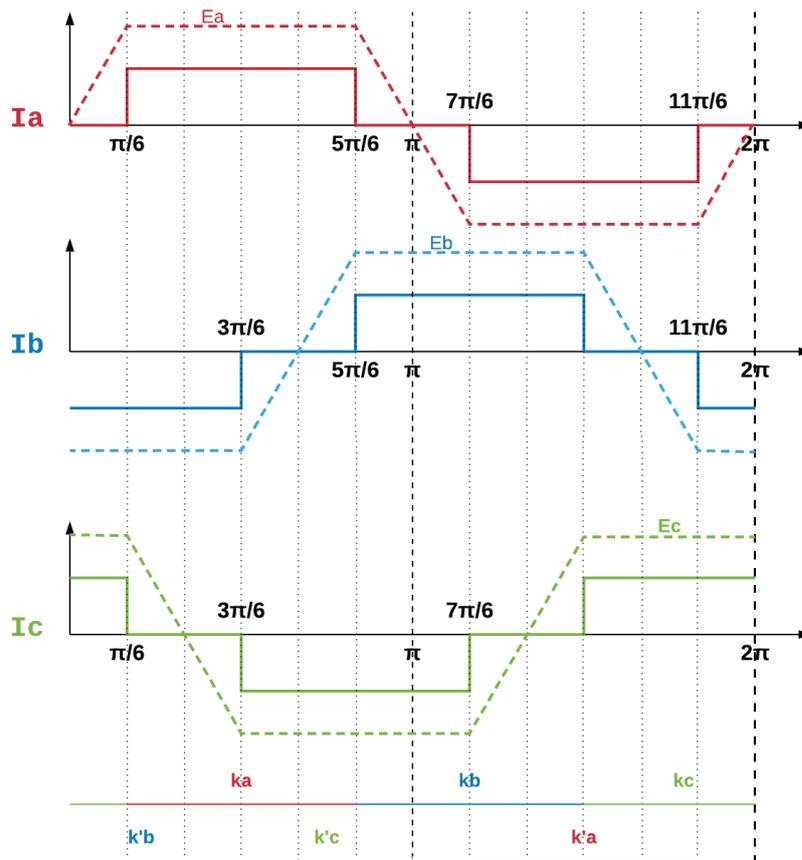


FIGURE 4.13 – Changement d'état de la sortie du capteur à effet Hall

- Estimation basée sur la mesure de l'inductance de phase ;
- Détection de la position à l'arrêt à partir de la saillance magnétique ;
- Estimation de la position initiale par injection d'un signal à haute fréquence ;
- Détection de la position initiale par l'application des impulsions de tension ;

VII.2.1) Estimation basée sur la mesure de l'inductance de phase

Cette méthode a été développée au début des années 90 elle est basé sur identification la position du rotor de la machine en fonction de l'inductance de phase en utilisant des grandeurs électriques mesurables comme la tension et le courant.

A l'arrêt, la vitesse de rotation est nulle, par conséquent, la variation du courant dans l'enroulement du stator qui est due à la variation de l'inductance, nous permet d'estimer la position du rotor à l'arrêt. Un algorithme a été proposé qui permet de donner la valeur de l'inductance de phase la plus proche de la valeur calculée afin d'augmenter la précision sur l'estimation de la position initiale.

Pour distinguer la position initiale θ_{r0} de $\theta_{r0} + \pi$ les valeurs des trois courants statoriques sont utilisées afin d'obtenir l'information exacte de la position du rotor.

Cette méthode permet d'obtenir des résultats satisfaisants en simulation et en pratique. Par contre, la méthode est sensible aux bruits causés par les dérivés des courants statoriques. De plus, le calcul des inductances est long, difficile et demande également une parfaite connaissance des

paramètres du moteur et de sa température.

VII.2.2) Détection de la position à l'arrêt à partir de la saillance magnétique

Dans cette méthode on détermine la position du rotor par application d'impulsions courtes de courant dans les phases du moteur, permettant de détecter l'état de saturation locale du circuit magnétique.

Cette variation du niveau de saturation est due aux flux engendrés par des aimants permanents, ou par excitation séparée.

L'alimentation simultanée des trois phases par un onduleur constitué de six transistors, permet de détecter la position initiale avec une résolution de 30 degrés électriques, à partir du signe du flux composé.

Cette approche nécessite une connaissance parfaite de la géométrie du moteur et des caractéristiques physiques des matériaux qui le constituent (courbe de magnétisation, etc.).

L'interaction entre les courants de phase et le niveau de saturation est un problème fortement non linéaire et complexe qui nécessite une analyse théorique plus profonde des phénomènes. Par conséquent, il est nécessaire de faire les essais avec différentes amplitudes de courant avant que la méthode fonctionne correctement. Ainsi, il s'avère que cette méthode est non utilisable pour des moteurs à grande constante de temps électrique ce qui limite son champ d'application.

Une autre approche d'estimation de la position de l'axe du rotor est basée sur la saillance magnétique du rotor et l'utilisation des déphasages entre les tensions de référence et les courants suivant les axes d, q. La méthode employée par ces derniers, consiste en effet à exciter le moteur par un courant de référence selon l'axe d, ensuite par un courant de référence selon l'axe q, à condition de bien choisir leurs amplitudes pour éviter la rotation du rotor de la machine.

L'estimation de la position initiale est périodique de 180°, ce qui donne deux domaines possibles. Pour lever cette ambiguïté, on procède à l'excitation du moteur par un courant d'amplitude assez grande pour saturer le circuit magnétique de la machine. Malheureusement, le moteur tourne pendant l'essai de saturation, ce qui n'est pas acceptable sur le plan pratique. L'utilisation d'un filtre passe bas, pour détecter le déphasage entre le courant et la tension de référence, produit une erreur de mesure. C'est pourquoi, en pratique, plusieurs essais ont été réalisés pour vérifier la faisabilité de la méthode. L'avantage de cette méthode est sa robustesse vis-à-vis de la variation de la résistance statorique et le changement de la température.

VII.2.3) Estimation de la position initiale par injection d'un signal à haute fréquence

Les méthodes d'estimation de la position du rotor basées sur la tension d'alimentation de la machine ne sont pas valables à l'arrêt.

C'est pourquoi il est nécessaire d'injecter une tension supplémentaire indépendante de la tension de référence d'alimentation de la machine. Cette tension doit être faible de manière à éviter la rotation du rotor et d'engendrer le minimum de perturbations possibles (couple et pertes).

En effet, cette tension à haute fréquence est sinusoïdale triphasée équilibrée. La gamme de fréquence est comprise entre quelques centaines de Hertz jusqu'à 3-4 KHz.

Les composantes des courants suivant l'axe d et q sont faibles et ayant des amplitudes proportionnelles à la moyenne des inductances d'axe direct et d'axe transversal sont fonctions de la position initiale du rotor.

Il suffit, ensuite, d'appliquer une boucle à verrouillage de phase (PLL) pour estimer cette position. Contrairement à la précédente méthode, une autre technique se focalise sur un autre aspect des équations électriques de la machine pour remonter jusqu'à la position initiale du rotor. Il s'agit d'utiliser la saillance "naturelle" due à la saturation vue du stator. Cette saturation est due, en général, au flux principal de l'aimant permanent.

L'estimation de cette saillance provoque la détermination de la position de l'axe d.

L'interaction entre la tension injectée et la saillance produit des harmoniques dans les courants statoriques.

Le traitement de signal du deuxième harmonique de courant permet d'extraire la position initiale du rotor.

VII.2.4) Détection de la position initiale par l'application des impulsions de tension

Le principe de la méthode consiste à alimenter le stator du MSAP par des impulsions de tension dans les différentes configurations de phases et de mesurer les courants qui en résultent.

En effet, l'application d'impulsions de tension aux bornes des bobinages donne naissance à des à-coups de couple. Ceci conduit à des faibles déplacements intempestifs du rotor, ce qui exige le bon choix de la durée de l'impulsion afin de s'affranchir à ce problème.

Avec cette méthode la position du rotor est estimée sans qu'on ait besoin d'un matériel additionnel et sans calcul complexe. Bien évidemment, pour aboutir à une bonne précision, il faut réduire au maximum l'effet du bruit dans le courant.

Cette méthode pourrait être appliquée pour les machines de faible saillance. En effet, nous pouvons détecter la position du rotor à partir des différents signes des courants crêtes.

Pour conclure, cette technique exige une identification parfaite du temps de réponse de chaque machine, ce qui évite le chevauchement entre les courants des deux impulsions successives de tension.

VIII) commande avec capteur mécanique

Le contrôle de la position, déplacement, et de la vitesse est un problème habituellement rencontré sur les systèmes automatisés. Les systèmes de détection conventionnels, interrupteurs de position, détecteur inductif ou photoélectrique trouvent rapidement leurs limites dès lors que le nombre de positions à contrôler devient trop important.

VIII.1) Le codeur incrémental

Le codeur incrémental ou relatif est également appelé générateur d'impulsions est un dispositif permette de maîtriser le positionnement d'un mobile avec une grande précision. Un codeur incrémental fournit une position relative, le signal de retour étant toujours référencé à une position de

départ.

VIII.1.1) Principe de fonctionnement

Le codeur incrémental est constitué de deux parties : Un codeur optique est un capteur angulaire de position, lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne, son axe fait tourner un disque qui comporte une succession de zones opaques et transparentes. La lumière émise par des diodes électroluminescentes arrive sur des photodiodes chaque fois qu'elle traverse les zones transparentes du disque. Les photodiodes génèrent alors un signal électrique

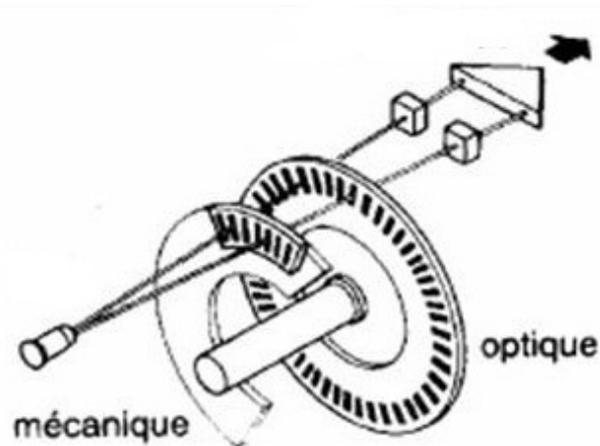


FIGURE 4.14 – Principe de fonctionnement du codeur incrémental

Le comptage décomptage des impulsions permet de définir la position et la vitesse de rotation le sens de rotation et déterminé à partir des fronts montants des signaux générés (A) et (B)

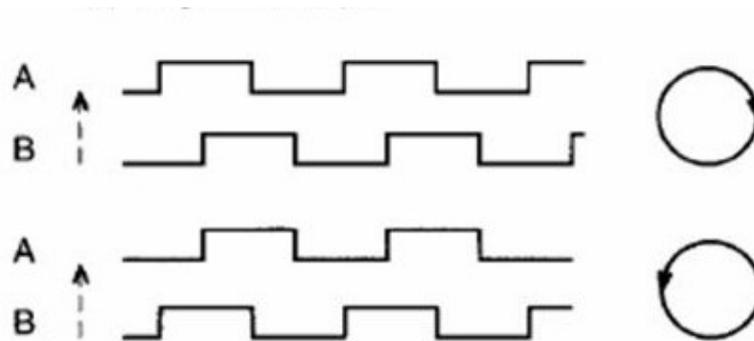


FIGURE 4.15 – Sens de rotation du codeur incrémental

- si le front montant du signal (A) est en avance par rapport au signal (B) le moteur tourne au sens horaire
- si le front montant du signal (B) est en avance par rapport au signal (A) le moteur tourne au sens antihoraire

VIII.2) Le codeur incrémental utilisé

Pour notre réalisation on a opté pour HEDL-5540-A13 avec un codeur optique a trois canaux HEDS-9140.

VIII.2.1) HEDL-5540-A13 Encoder Line Drivers

Des conducteurs de ligne d'encodeur sont disponibles pour les codeurs de la série HEDS-9140.

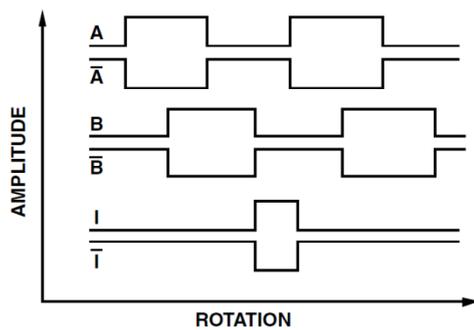
Ce conducteur de ligne offre des performances améliorées lorsque le codeur est utilisé dans des environnements bruyants ou lorsqu'il est nécessaire pour parcourir de longues distances.

Le pilote de ligne de codeur utilise une ligne standard de l'industrie pilote qui fournit des informations complémentaires sorties pour chaque canal de codeur. Ainsi, la sortie de l'encodeur de pilote de ligne est A, \bar{A} , B, \bar{B} et I / \bar{I} pour les versions à trois canaux.



FIGURE 4.16 – Conducteurs de ligne d'encodeur

Waveforms



Block Diagram

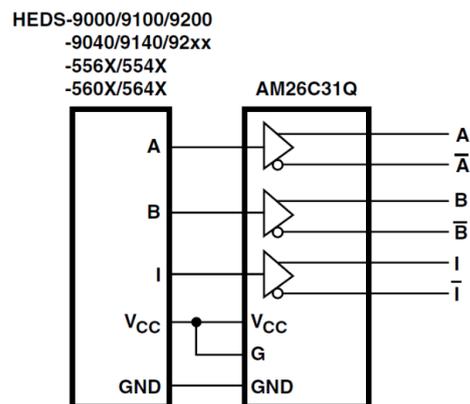


FIGURE 4.17 – Les sorties complémentaires pour les trois canaux.

VIII.2.2) HEDS-9140 Three Channel Optical Incremental Encoder Modules

La série HEDS-9140 est un module de codeur incrémental optique à trois canaux. Utilisés avec une roue codeuse, ce module détecte la position de rotation.

Chaque module consiste en une source LED à lentille et un circuit intégré de détection enfermé dans un petit boîtier. Ce module offre une précision élevée grâce à la source de lumière hautement collimatée et à la matrice de photodétecteurs unique. (figure 4.19)



FIGURE 4.18 – sens de rotation du codeur incrémental

Avec :

C : la période 360° électrique.

P : la demi-période dont la sortie égale à 1.

S : Le nombre de degrés électriques entre une transition dans la sortie du canal (A) et le transition voisine dans la sortie du canal (B). Il y a 4 états par cycle donc 90° électrique.

ϕ : le déphasage entre le signal de la sortie du canal (A) et le signal de la sortie du canal (B), il est de 90° électrique.

IX) Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons modélisé les différents éléments du système (Convertisseur-MSAP) par ce que cette partie est nécessaire pour l'intégration de la MSAP dans les systèmes de commandes. Le modèle mathématique de la MSAP est obtenu dans le repère de Park moyennant des hypothèses simplificatrices pour avoir des équations considérablement simplifiées pour nous permettent d'aborder aisément la commande vectorielle.

Le développement de la commande vectorielle permet d'atteindre un découplage entre les axes « d » et « q » ce qui rend la machine synchrone à aimants permanents similaire à la machine à courant continu. Dans le chapitre suivant nous allons aborder la conception et réalisation pratique du kart électrique.

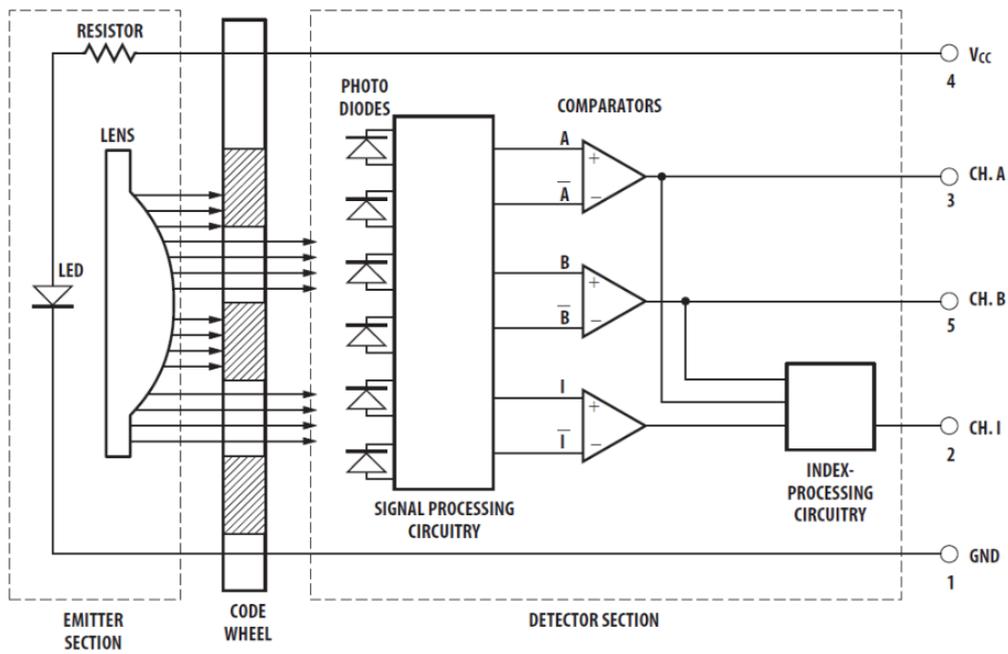


FIGURE 4.19 – Datasheet du codeur incrémental

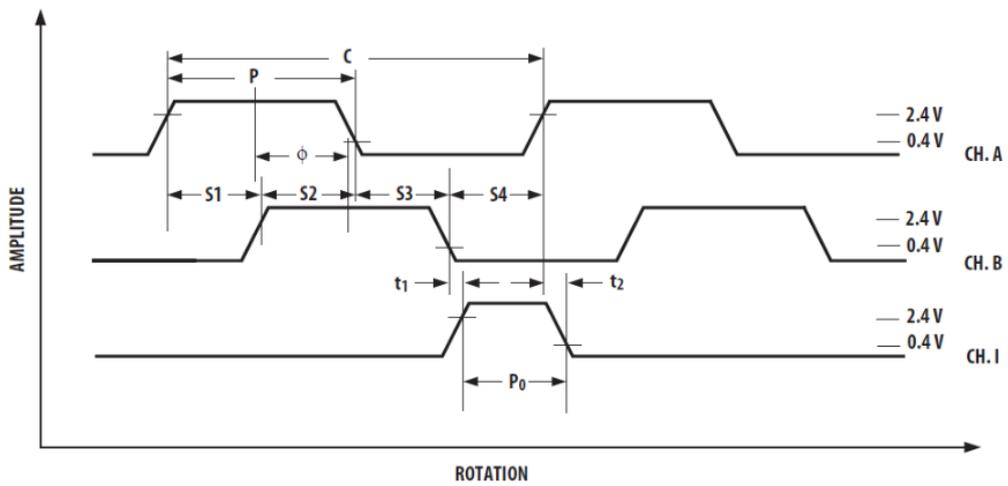


FIGURE 4.20 – Signaux en sortie

Chapitre 5

Conception et réalisation pratique du kart électrique

I) Introduction

Pour réaliser un kart électrique, il faut faire un compromis entre la puissance, la consommation d'énergie, le poids, le volume, le prix et l'autonomie[29]. Le kart électrique représente un bon support pédagogique pour mettre en œuvre ces compromis. Afin de donner un sens à cet objectif, c'est l'occasion pour les étudiants d'acquérir de nouvelles compétences.

II) Conception de kart électrique

Le principe de notre réalisation est schématisé dans la Figure 5.1, il s'agit d'un kart électrique à deux roues motrices entraînées par deux moteurs synchrones à aimant permanent par intermédiaire de 2 réducteurs de vitesse et d'une batterie. Le contrôle est implanté sur un microcontrôleur F28069M d'une carte Launchpad XL. Cette dernière est placée dans le VE. Elle possède deux boucles de régulation (courant et vitesse). La partie puissance est assurée par 2 Onduleurs.

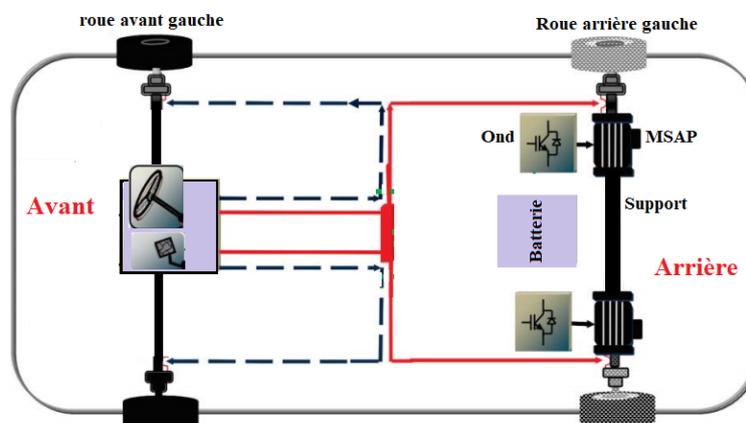


FIGURE 5.1 – Schéma de conception du kart.

III) Partie mécanique "étapes de conception du kart électrique"

III.1) Description des différentes étapes de conception :

Le kart doit avoir :

- ❶ Des freins.
- ❸ Des pare-chocs pour empêcher les roues arrière d'entrer en contact avec un autre kart.
- ❺ Des pièces standard doivent être utilisées.
- ❷ Garde de chaîne.
- ❸ Pas de bords tranchants.
- ❹ Géométrie de direction correcte.

III.1.1) Matériels :

III.1.2) châssis :

- ➔ un tube PVC 8 m de longueur pour 20/27 mm de diamètre.
- ➔ un tube de section carré de 60 cm de long pour 45 mm de diamètre.
- ➔ une barre de 40 cm sur 1,5 cm de diamètre.
- ➔ une plaque d'acier de 5 mm d'épaisseur avec des dimensions légèrement supérieures à celles du moteur choisi.
- ➔ du multipliés ou du métal.
- ➔ 2 amortisseurs.
- ➔ appareil de filetage tube pvc.

III.1.3) Motorisation :

- ➔ 2 moteurs (synchrone à aimant permanent).
- ➔ Deux Onduleurs de puissance triphasée.
- ➔ 2 réducteurs.
- ➔ des boulons et des rondelles.

III.1.4) Motorisation :

- ➔ 1 DSC launchPad 69M
- ➔ 4 roues.
- ➔ un volant.
- ➔ frein à main.
- ➔ un arbre de transmission.
- ➔ des roulements.
- ➔ un arbre de direction.
- ➔ une pédale de frein.

➔ une pédale d'accélération.

III.1.5) Sous-virage :

Se produit lorsque l'avant d'une voiture a tendance à aller tout droit lorsque vous tournez le volant dans un coin. Vous pouvez sentir les pneus frotter contre le tarmac. La plupart des voitures modernes sont à traction avant et ont tendance à sous-virer. C'est une sécurité en soi, car la vitesse est réduite, et tant que la route est suffisante, les pneus finissent par accrocher et faire tourner la voiture comme vous le souhaitez !

III.1.6) Survirage :

Cela se produit lorsque l'arrière de la voiture s'éloigne de la direction du virage. Les voitures à traction arrière sont beaucoup plus exposées à cela. C'est moins sûr que le sous-virage, car cela peut être le prélude à la rotation, et le fait de lever soudainement la puissance (ce qui est une réaction naturelle) peut en fait provoquer la rotation lorsque les pneus sont « mordants ».

III.1.7) Courbure :

La courbure est l'angle de la roue par rapport à la verticale, vue de l'avant ou de l'arrière de la voiture. Si la roue se penche vers le châssis, elle présente une courbure négative. S'il se penche loin de la voiture, il a un cambre positif. Donc, sur un kart, il devrait être 0. Au milieu des positifs et des négatifs.

III.1.8) Roulette :

L'inclinaison vers l'arrière de la fourche de direction sur un vélo illustre bien l'angle positif de la chasse. La roulette positive place évidemment la roue avant devant son point de pivot et la plupart des véhicules sont conçus avec un angle de roulette positif. Il s'agit de l'angle créé par le pivot de la direction entre l'avant et l'arrière du véhicule. Le lanceur est positif si la ligne est inclinée vers l'avant et négatif s'il est en arrière.

III.1.9) Conception du cadre :

C'est le design que nous avons conçu pour le karting et que nous avons obtenu grâce à la conception Internet d'un karting. Nous avons basé le cadre sur les karts. Nous fabriquons le cadre à partir de tubes **PVC** 20/27 mm.

Les roues avant ont besoin d'espace pour bouger, elles ne doivent pas frotter le pneu.

Il est difficile de faire plusieurs courbes, alors gardez le cadre aussi simple que possible.

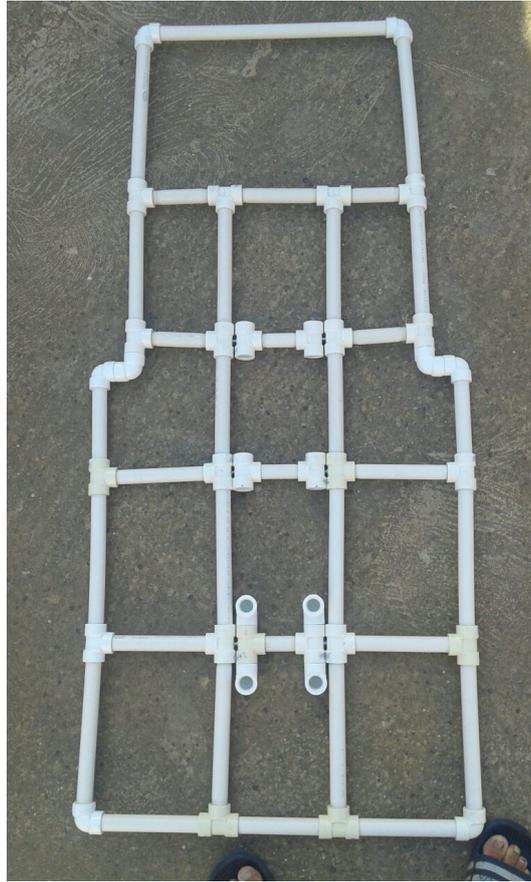


FIGURE 5.2 – Conception du cadre avec tube en PVC.

La chassiss doit pouvoir être ajustée. Le reste de la conception est fait pour vous tant que tout fonctionne (y compris le pilote) et que le kart a bonne mine, le reste des mesures n'est pas très important à ce stade. Il est utile de tout dessiner en taille réelle sur un établi.

Le conducteur est la partie la plus importante. La position de conduite doit donc être confortable et le haut du volant autour des bras et des jambes à la hauteur des épaules et légèrement plié. Les angles de braquage doivent être corrects.

III.2) Réalisation du châssis et la suspension

- La partie la plus importante d'un kart est un châssis solide qui résistera pendant que vous conduire et qui pourra accueillir le moteur.

❶ **Découpez le tube de PVC** : Découpez les longueurs de tubes selon les mesures dont vous avez besoin, en suivant vos plans et vos schémas.

- Pour la plupart des modèles, le devant du kart sera incurvé, plus pointu que l'arrière, ce qui permet de donner plus d'espace aux roues pour tourner et de laisser le châssis se courber légèrement. Pour ce faire, montez la cheville ouvrière sur les coins du devant, là où je mets plus tard les roues, pour laisser le châssis se courber facilement.[5.3](#)

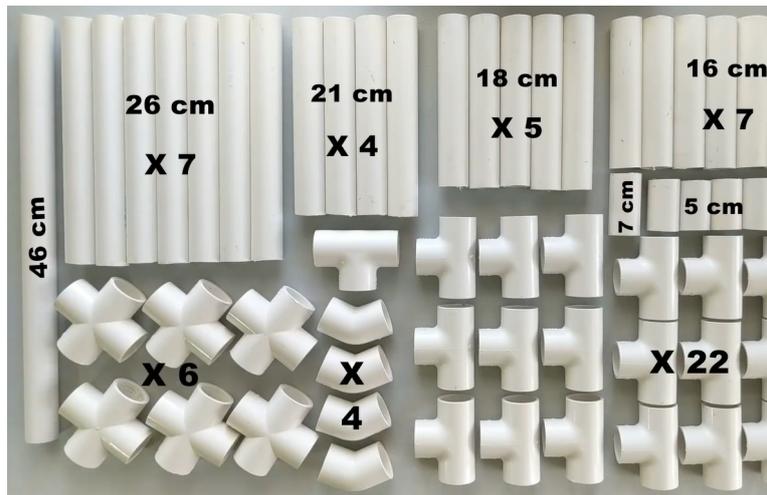


FIGURE 5.3 – Découpage tube de PVC.

② **Réalisation du filetage** : Le filetage a été réalisé manuellement. Il consiste à exécuter des filets sur l'extérieur d'un tube PVC ou d'une tige. Ceci permet le vissage ultérieur d'écrous ou de manchons de raccordement.

③ **découpe bois "multipliés" sur mesure** : Le Multiplis est un contreplaqué constitué de plusieurs feuilles, L'épaisseur de ce panneau 12mm. Faire couper les longueurs de multiplis selon les dimensions dont vous avez utiliser sur le PVC, en suivant vos plans et vos schémas.



FIGURE 5.4 – Bois "Multiplis".

④ **Fixage du cadre avec le multiplis** : Pour fixer la structure du PVC avec le multiplis on utilise un collier de fixation simple en acier pour tube PVC de 20/27 mm (6 pièces)

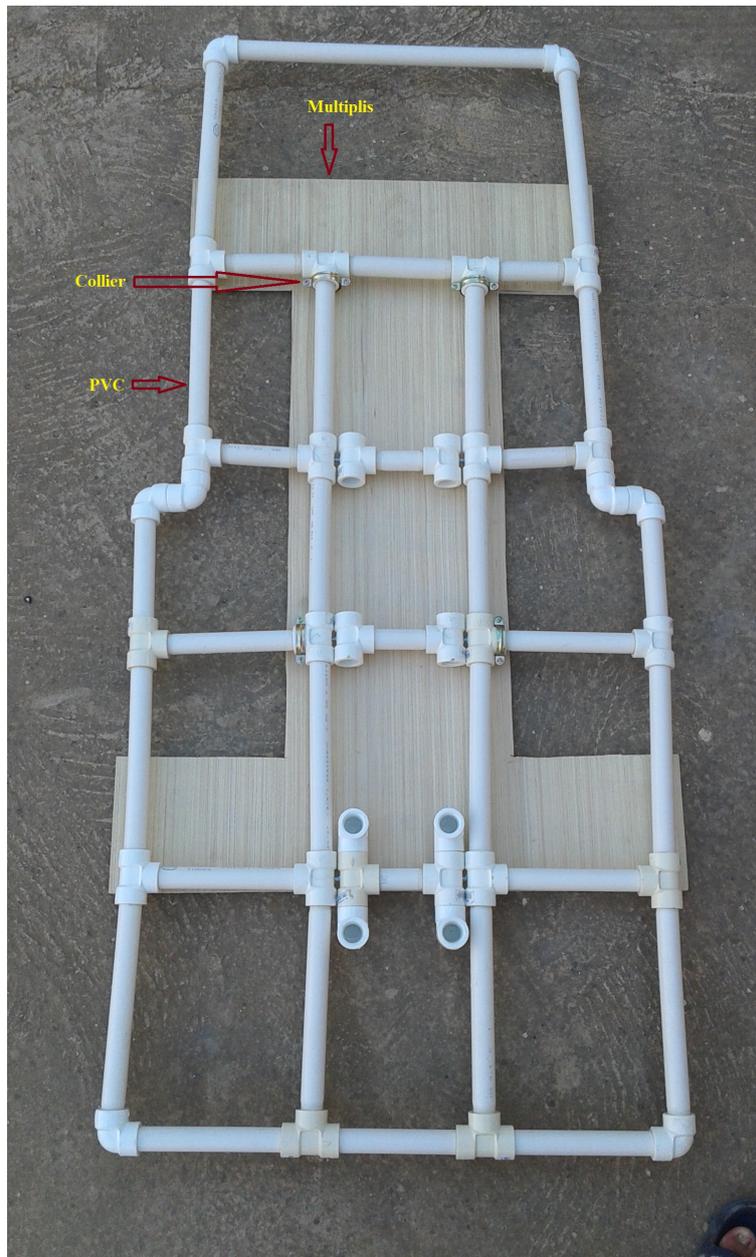


FIGURE 5.5 – Fixage pvc/multiplier.

⑤ **L'essieu arrière et les roues** : Il faut mettre un essieu porteur avec un support à roulements pour l'essieu arrière, ce qui signifie que l'essieu en lui-même peut être soudé au châssis tout en tournant librement. Donc il faut souder une plaque d'acier sur le châssis.



FIGURE 5.6 – essieu arrière

⑥ **Monter le moteur** : Mettre un support pour le moteur et souder une plaque d'acier de 4 cm d'épaisseur à l'arrière du châssis pour y installer les 2 moteurs. Placez ensuite le moteur sur la plaque et marquez l'emplacement des trous destinés aux vis de fixation.



FIGURE 5.7 – Moteurs utilisés



FIGURE 5.8 – Fixage les deux moteurs avec l'essieu arrière

⑦ **Choisir un accouplement** : L'accouplement est utiliser pour relier le moteur au réducteur, il est choisi selon le diamètre du moteur (6mm) et du réducteur (8mm)

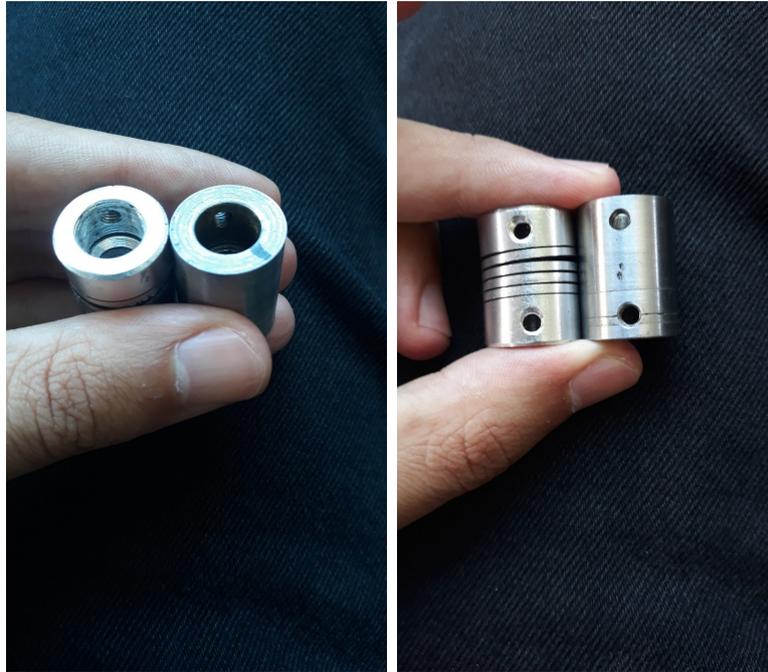


FIGURE 5.9 – Accouplement

⑧ **Montez la direction** : Utilisez la tige PVC pour la colonne de direction et la barre pour les essieux. Pour plier la barre suivant un angle de 90 degrés, Les figures suivantes montrent les étapes du direction utilisées :



FIGURE 5.10 – Le support



FIGURE 5.11 – Les roues utilisées



FIGURE 5.12 – Fixage de la roue avec le support



FIGURE 5.13 – Aperçu des deux roues



FIGURE 5.14 – Aperçu des deux roues



FIGURE 5.15 – Une simple volant



FIGURE 5.16 – La suspension



FIGURE 5.17 – Couplage moteur réducteur



FIGURE 5.18 – Structure Générale

⑨ La structure générale : Les images suivantes montrent notre structure générale :



FIGURE 5.19 – structure générale



FIGURE 5.20 – structure générale

IV) Partie électrique et électronique "Hardware"

IV.1) Carte électronique Launchpad XL F28069M

IV.1.1) Introduction :

Le Lanceur C2000™ Piccolo™ LaunchPad™, **LAUNCHXL-F28069M**, est une carte de développement complète à faible coût pour les appareils Texas Instruments Piccolo F2806x et la technologie InstaSPIN. Le kit LAUNCHXL-F28069M contient tout le matériel informatique et les logiciels nécessaires au développement d'applications basées sur le microprocesseur F2806x. Le LaunchPad est basé sur le périphérique super-ensemble F28069M et permet facilement aux utilisateurs de migrer vers des périphériques F2806x moins coûteux une fois que les besoins en matière de conception sont connus. Il offre un outil d'émulation JTAG intégré permettant une interface directe avec un PC pour faciliter la programmation, le débogage et l'évaluation. Outre l'émulation JTAG, l'interface USB fournit une connexion série UART du périphérique F2806x au PC hôte. Les utilisateurs peuvent télécharger une version illimitée de Code Composer Studio™ IDE pour écrire, télécharger et déboguer des applications sur la carte LAUNCHXL-F28069M. Le débogueur est discret, permettant à l'utilisateur d'exécuter une application à toute vitesse, avec des points d'arrêt matériels et un pas à pas disponibles sans consommer de ressources matérielles supplémentaires.[1]

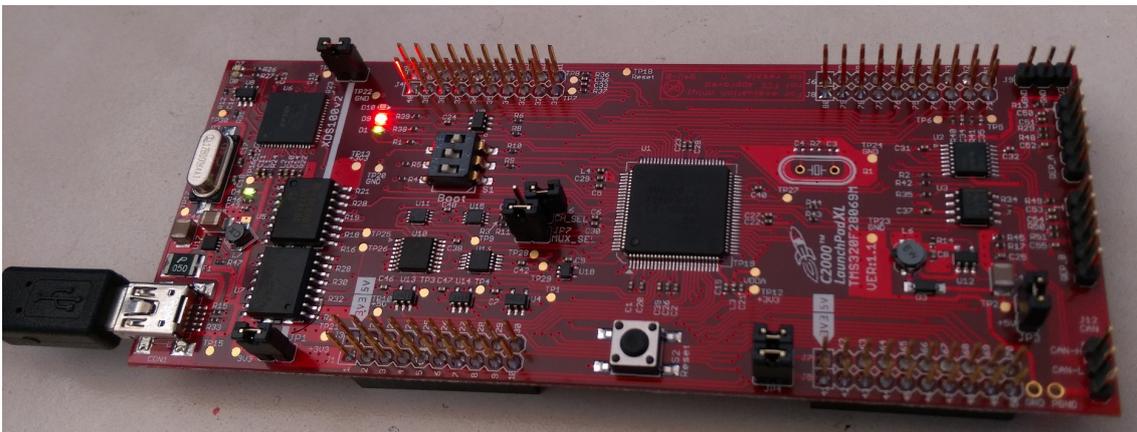


FIGURE 5.21 – Launchpad XL F28069M. [1]

Comme illustré à la figure 5.22, les fonctionnalités du LaunchPad du **LAUNCHXL-F28069M** C2000 sont les suivantes :

- Interface de programmation et de débogage USB via un émulateur XDS100v2 à haute vitesse, à isolation galvanique et connexion **USB / UART**.
- Périphérique Superset F28069M qui permet aux applications de migrer facilement vers des périphériques moins coûteux.
- Deux LED d'utilisation.
- Bouton de réinitialisation de la carte.
- Broches de périphérique facilement accessibles à des fins de débogage ou comme sockets pour ajouter des cartes d'extension personnalisées.

- Bibliothèque **InstaSPIN** en ROM, permettant l'implémentation des solutions **InstaSPIN-MOTION** et **InstaSPIN-FOC**.
- Deux interfaces de codeur en quadrature 5V.
- Interface **CAN** avec émetteur-récepteur intégré.
- Commutateurs de sélection de démarrage.

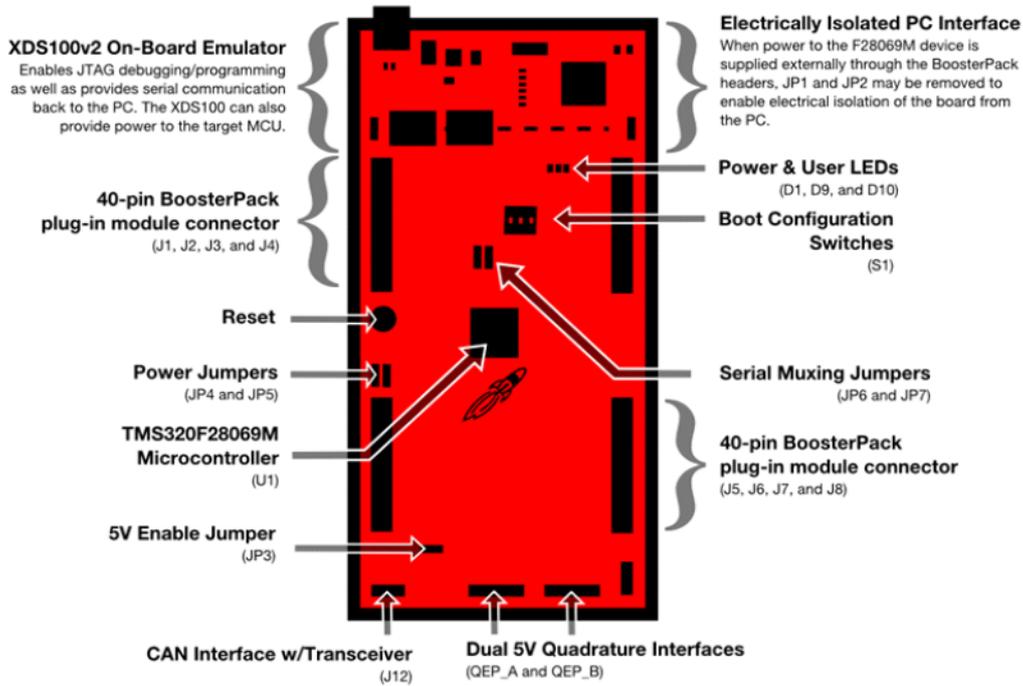


FIGURE 5.22 – Présentation de la carte LAUNCHXL-F28069M. [1]

LAUNCHXL-F28069M Pin map	BoosterPack standard	LAUNCHXL-F28069M Pin map	LAUNCHXL-F28069M	LAUNCHXL-F28069M Pin map	BoosterPack standard	LAUNCHXL-F28069M Pin map	
+3.3V	+3.3V	+8V	+5V	P0 (0) EPWM1A	PWM	GPIO (0) GND	GND
ADCINA6	Analog In	GND	GND	P1 (0) EPWM1B	PWM	GPIO (0) PWM	GPIO (0) P19 (0) ECAP1
SCIA RXD P28	UART RX (→MCU)	Analog In	ADCINA7	P2 (0) EPWM2A	PWM	GPIO (0) SPI CS	GPIO (0) P44
SCIA TXD P29	UART TX (→MCU)	Analog In	ADCINB1	P3 (0) EPWM2B	PWM	GPIO (0) GPIO**	
(0) P12	GPIO (0)	Analog In	ADCINA2	P4 (0) EPWM3A	Timer	GPIO (0) RST	RST
ADCINB6	Analog In	Analog In	ADCINB2	P5 (0) EPWM3B	Timer	GPIO (0) SPI MOSI	P16 SPI SIMO
SPIA CLK P18	SPI CLK	Analog In	ADCINA0	P13 (0)	GPIO (0)	SPI MISO	P17 SPI SOMI
(0) P22	GPIO (0)	Analog In	ADCINB0	DAC1	GPIO (0)	SPI CS	GPIO (0) P80
I2CA SCL P33	I2C SCL	Reserved	ADCINA1	DAC2	GPIO (0)	SPI CS	GPIO (0) P81
I2CA SDA P32	I2C SDA	Reserved			GPIO (0)	GPIO (0)	GPIO (0) P85
+3.3V	+3.3V	+8V	+8V	P6 (0) EPWM4A	PWM	GPIO (0) GND	GND
SCIB RXD P15	Analog In	GND	GND	P7 (0) EPWM4B	PWM	GPIO (0) PWM	GPIO (0) P27 (0)
SCIB TXD P58	UART RX (→MCU)	Analog In	ADCINB7	P8 (0) EPWM5A	PWM	GPIO (0) SPI CS	GPIO (0) P28 (0)
(0) P20	GPIO (0)	Analog In	ADCINB4	P9 (0) EPWM5B	PWM	GPIO (0) GPIO**	
SPIB CLK P14	SPI CLK	Analog In	ADCINA5	P10 (0) EPWM6A	Timer	GPIO (0) RST	RST
(0) P21	GPIO (0)	Analog In	ADCINB5	P11 (0) EPWM6B	Timer	GPIO (0) SPI MOSI	P24 SPI SIMO
(0) P23	GPIO (0)	Analog In	ADCINA3	DAC3	GPIO (0)	SPI MISO	P25 SPI SOMI
P54	I2C SCL	Reserved	ADCINB3	DAC4	GPIO (0)	SPI CS	GPIO (0) P82
	I2C SDA	Reserved	ADCINA4		GPIO (0)	SPI CS	GPIO (0) P83
					GPIO (0)	GPIO (0)	GPIO (0) P86

FIGURE 5.23 – la carte LAUNCHXL-F28069M. [1]

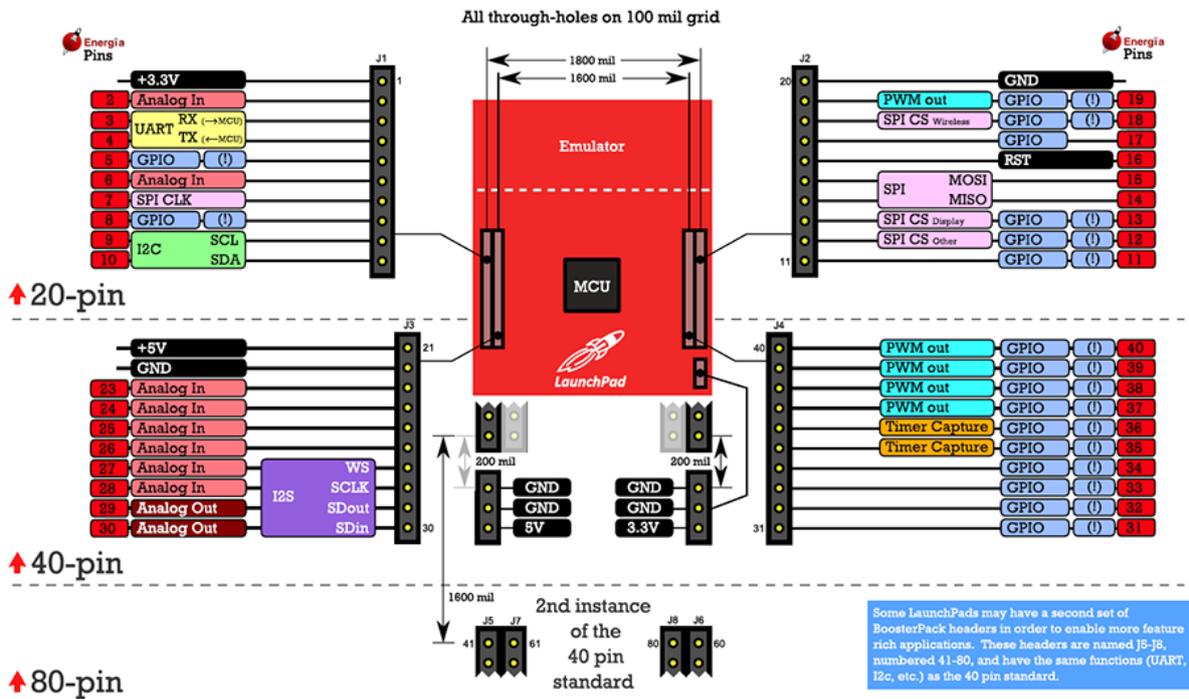


FIGURE 5.24 – Emulateur & MCU

commande de 2 MS avec et sans codeur incrémental avec Index, Donc La configuration matérielle est :

La 1ère partie J1-J4 va recevoir l'onduleur DRV8305 La 2ème partie J5-J8 va recevoir l'onduleur DRV8305

J1-J4 :

J1.1 +3.3V	J3.21 +5V	J4.40 PWM1A PWMHA	J2.20 GND
J1.2	J3.20 GND	J4.39 PWM1B PWMLA	J2.19 SCS
J1.3 FAULT	J3.23 ADCINA7 VSENA	J4.38 PWM2A PWMHB	
	J3.24 ADCINB1 VSENB	J4.37 PWM2B PWMLB	J2.17
	J3.25 ADCINA2 VSENC	J4.36 PWM3A PWMHC	J2.16 PWRGD
	J3.26 ADCINB2 VSEN PVDD	J4.35 PWM3B PWMLC	J2.15 SDI
J1.7 SCLK	J3.27 ADCINA0 ISENA		J2.14 SDO
	J3.28 ADCINB0 ISENB		J2.19 ENGATE
J1.09 SCL OLED	J3.29 ADCINA1 ISENC		J2.19 WAKE
J1.10 SDA OLED			J2.11

J5-J8 :

J5.41 +3.3V	J3.21 +5V	J4.40 PWM1A PWMHA	J2.20 GND
J1.2	J3.20 GND	J4.39 PWM1B PWMLA	J2.19 SCS
J1.3 FAULT	J3.23 ADCINA7 VSENA	J4.38 PWM2A PWMHB	
	J3.24 ADCINB1 VSENB	J4.37 PWM2B PWMLB	J2.17
	J3.25 ADCINA2 VSENC	J4.36 PWM3A PWMHC	J2.16 PWRGD
	J3.26 ADCINB2 VSEN PVDD	J4.35 PWM3B PWMLC	J2.15 SDI
J1.7 SCLK	J3.27 ADCINA0 ISENA		J2.14 SDO
	J3.28 ADCINB0 ISENB		J2.19 ENGATE
	J3.29 ADCINA1 ISENC		J2.19 WAKE
			J2.11

FIGURE 5.25 – Jumper 1_4 & 5_8

IV.1.2) Installation :

Le LaunchPad F28069M est pris en charge dans Code Composer Studio et Energia, selon vos préférences en matière d'outils.

IV.1.2.α) Configuration de LAUNCHXL-F28069M : [30]

- Retirez les jumpers 1 et 2 pour isoler l'USB et l'alimentation de BOOSTXL-DRV8305.
- S1 réglé sur ON-ON-ON.
- JP3, 6, 7 ON.
- JP4, 5.
 - ❶ ON-ON : si vous utilisez uniquement les en-têtes inférieurs BoosterPack J5-J8.
 - ❷ OPEN-OPEN : si vous utilisez les en-têtes BoosterPack supérieurs J1-J4 ou les deux en-têtes BoosterPack J1-J4 & J5-J8.
 - ❸ Fournissez un bus CC à chaque BoosterPack connecté.

IV.1.2.β) Contrôleurs **Piccolo InstaSPIN** activés : LaunchPad LAUNCHXL-F28069M pour InstaSPIN-FOC Inclut le JTAG XDS100v2 sur carte (isolé)

IV.1.2.γ) **3-phase Inverters** : Low Voltage / Medium Current : boostxldr8305_reVA PN : BOOSTXL-DRV8305

IV.1.3) Mise en route du LAUNCHXL-F28069M :

IV.1.3.α) **Mise en route** : Lors de la première utilisation du **LAUNCHXL-F28069M**, une application de démonstration démarre automatiquement lorsque la carte est alimentée par un hôte USB. Il se peut que la carte ne démarre pas l'application de démonstration, Donc il faut essayez de placer S1 dans les positions suivantes et de réinitialiser la carte : **UP - UP - DOWN**. Pour démarrer la démonstration, connectez le LAUNCHXL-F28069M avec le câble mini-USB fourni à un port USB libre. L'application de démonstration commence par les LEDs clignotants indiquant que le périphérique est actif.

IV.1.3.β) **Application de démonstration et la température interne** : Le LAUNCHXL-F28069M comprend un appareil préprogrammé TMS320F28069M. Lorsque le LaunchPad est connecté via USB, la démonstration commence par une séquence de clignotement des LEDs. Après quelques secondes, l'appareil bascule dans un mode de mesure de la température.

IV.1.3.γ) **Programmer et déboguer l'application** : Le projet et le code source associée pour la démonstration C2000 Piccolo LaunchPad sont inclus dans le progiciel controlSUITE et doivent être automatiquement trouvés par l'explorateur de ressources TI dans Code Composer Studio v6. Dans l'explorateur de ressources, ouvrez le dossier controlSUITE, puis l'entrée Outils de développement et recherchez l'élément de ligne C2000 LaunchPad.

IV.1.4) Configuration matérielle :

Le LaunchPad F28069M offre aux utilisateurs plusieurs options pour configurer le tableau.

IV.1.4.α) Domaine de puissance : Le LaunchPad F28069M comporte plusieurs domaines d'alimentation permettant l'isolation JTAG. Les jumpers JP1, JP2, JP3, JP4 et JP5 configurent l'emplacement du passage de l'alimentation.

Jumper	Power Domain
JP1	Enable 3.3 V from USB (disables isolation)
JP2	Enable GND from USB (disables isolation)
JP3	Enable 5 V switcher (powered off 3.3 V supply of target device)
JP4	Connects target MCU 3.3 V to second set of BoosterPack headers
JP5	Connects target MCU 5 V to second set of BoosterPack headers

IV.1.4.β) Connectivité série : Le LAUNCHXL-F28069M intègre un adaptateur USB à **UART**. Il est ainsi facile d'imprimer les informations de débogage sur le PC hôte, même dans des environnements isolés. Le périphérique F28069M sur ce LaunchPad contient deux périphériques SCI (UART), tandis que le LaunchPad comporte trois emplacements auxquels ces périphériques doivent être routés. Pour cette raison, un multiplexeur de connectivité série a été ajouté à la carte pour faciliter la configuration du routage SCI. Le routage est configuré via deux jumpers (JP6 et JP7). Configurez les jumpers comme indiqué dans le tableau 1 pour la connectivité série souhaitée.

IV.1.4.γ) Sélection du mode de démarrage : [1] Le périphérique F28069M du LaunchPad comprend une ROM de démarrage qui effectue certaines vérifications de démarrage élémentaires et permet au périphérique de démarrer de différentes manières. La plupart des utilisateurs voudront soit effectuer une émulation démarrage ou un démarrage pour flasher (s'ils exécutent l'application autonome). **S1** a été fourni pour permettre aux utilisateurs de configurer facilement les broches vérifiées par la **ROM** d'amorçage pour prendre cette décision.

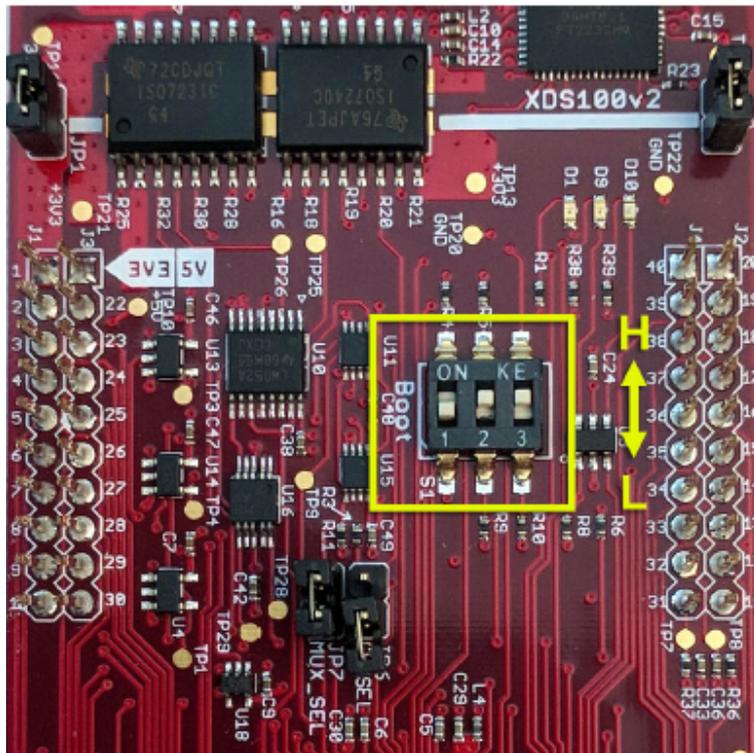


FIGURE 5.26 – Orientation du commutateur de démarrage. [1]

IV.2) BOOSTXL-DRV8305EVM

IV.2.1) Description :

Le DRV8305 est un circuit "gate driver IC" pour les applications d'entraînement par moteur triphasé. Il fournit trois circuits en demi-pont à haute précision et à compensation de température, chacun capable de piloter un MOSFET canal N à haut et à côté bas. Un pilote de pompe de charge supporte une Duty cycle de 100% et un fonctionnement à basse tension. L'appareil peut supporter des tensions de décharge de charge allant jusqu'à 45 V.

Le DRV8305 comprend trois amplificateurs bidirectionnels à dérivation de courant pour des mesures de courant précises côté bas qui prennent en charge des paramètres de gain variables et une référence de décalage ajustable.

Le DRV8305 est doté d'un régulateur de tension intégré (3,3 V ou 5 V) prenant en charge un MCU ou d'autres exigences en matière d'alimentation système. Le régulateur de tension peut être directement interfacé avec une interface physique LIN standard pour permettre des courants de veille à faible système.[2]

Le BOOSTXL-DRV8305EVM est un 15A, Entraînement sans balai triphasé, Le module possède un détecteur de tension de phase, ainsi qu'un détecteur de dérivation de courant côté bas individuel pour les algorithmes BLDC sans capteur. Le module fournit une alimentation 3,3 V MCU avec le régulateur abaisseur LMR16006 0.6A. L'étage de commande est entièrement protégé contre les courts-circuits, la protection thermique, la protection contre les surtensions et les sous-tensions et est facilement configurable via une interface SPI.

Le module est idéal pour évaluer et développer rapidement avec le DRV8305. Il est conçu pour fonctionner avec les LaunchPad XL compatibles. Le BoosterPack peut être combiné avec LAUNCHXL-F28207F pour InstaSPIN-FOC ou jusqu'à deux BoosterPacks peut être combiné avec LAUNCHXL-F28069M pour InstaSPIN-FOC ou InstaSPIN-MOTION. Les solutions InstaSPIN sont prises en charge via MotorWare.

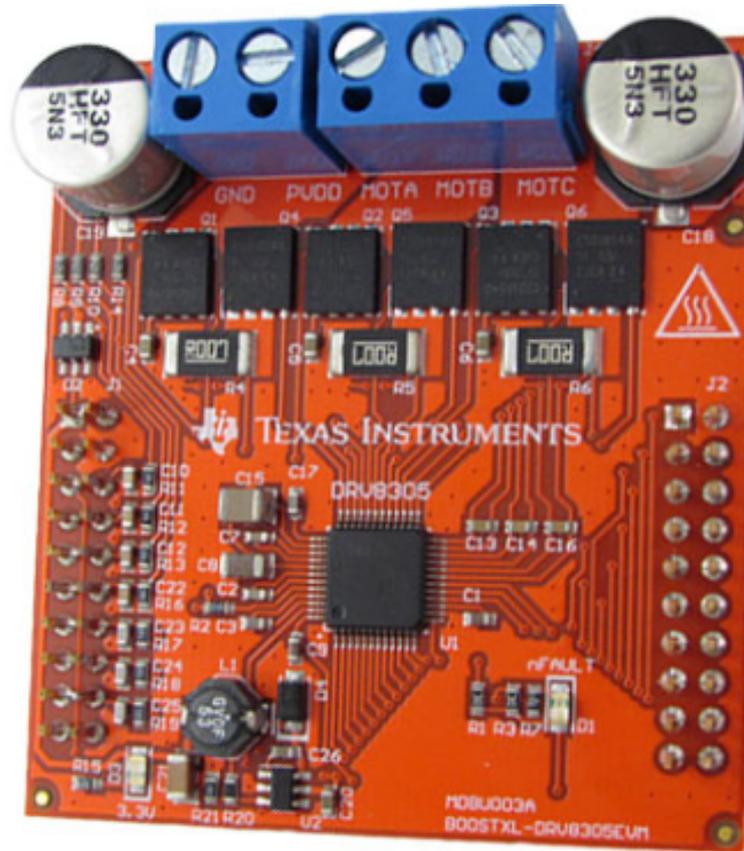


FIGURE 5.27 – BOOSTXL-DRV8305. [2]

IV.2.2) Caractéristiques :

- Tension de fonctionnement de 4,4 V à 45 V.
- Courants de crête de 1,25 A et 1 A.
- programmable à haut et bas Contrôle.
- Charge-Pump Gate Driver pour 100% Duty Cycle
- Trois amplificateurs de courant-shunt intégrés.
- LDO 50 mA intégré (options 3,3 V et 5 V).
- Contrôle d'entrée 3-PWM ou 6-PWM jusqu'à 200 kHz.
- Capacité de commutation unique en mode PWM.
- Prend en charge les interfaces numériques 3,3 V et 5 V.
- Interface périphérique série (SPI).
- HTQFP 48 broches thermiquement amélioré.
- Caractéristiques de protection :
 - ↔ Diagnostic de pannes et Watchdog MCU.
 - ↔ programmable le Contrôle du temps mort.

- Prévention décocher à travers de MOSFET.
- Moniteurs de surintensité MOSFET VDS.
- Détection de défaut du pilote de porte.
- Support de protection de batterie inversée.
- Support faible en mode Home.
- Avertissement de surchauffe et arrêt.

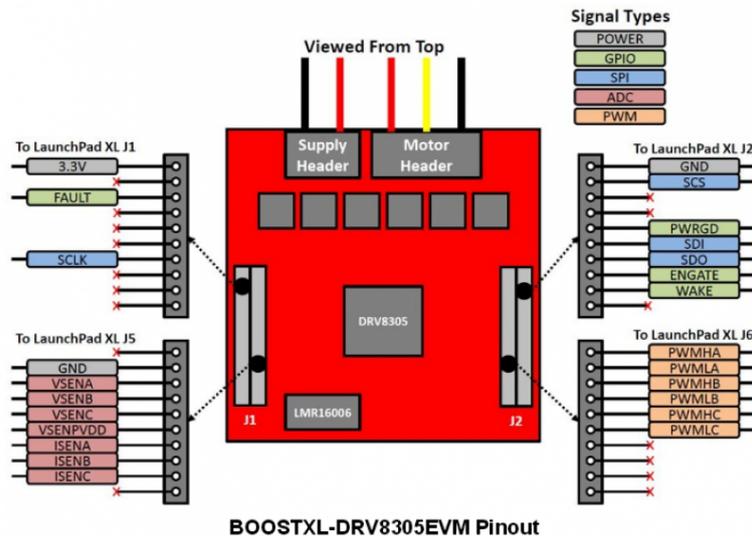


FIGURE 5.28 – BOOSTXL-DRV8305. [2]

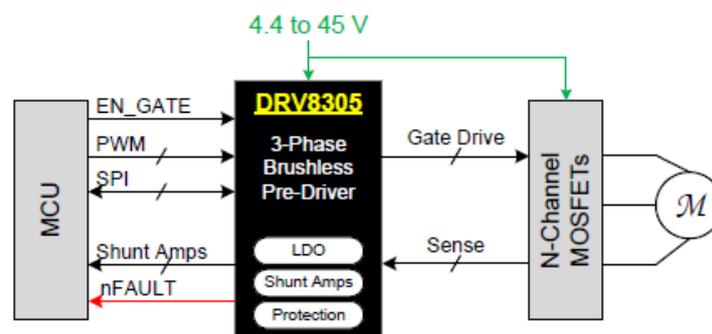


FIGURE 5.29 – Schéma simplifié. [2]

V) Partie Software

V.1) Code Composer Studio

Code Composer Studio IDE est disponible gratuitement sans restriction s'il est utilisé avec l'émulateur XDS100v2 sur le LaunchPad C2000.

Pour les projets de contrôle de moteur InstaSPIN, installez la dernière version de MotorWare.exe et exécutez MotorWare.exe. Dans la fenêtre qui s'ouvre, sous Ressources, suivez les instructions et Guide de démarrage rapide du GUI pour le LAUNCHXL-F28069M.

V.1.1) Installez le logiciel :

Une fois téléchargé, installez Code Composer Studio et C2000Ware ou controlSUITE.

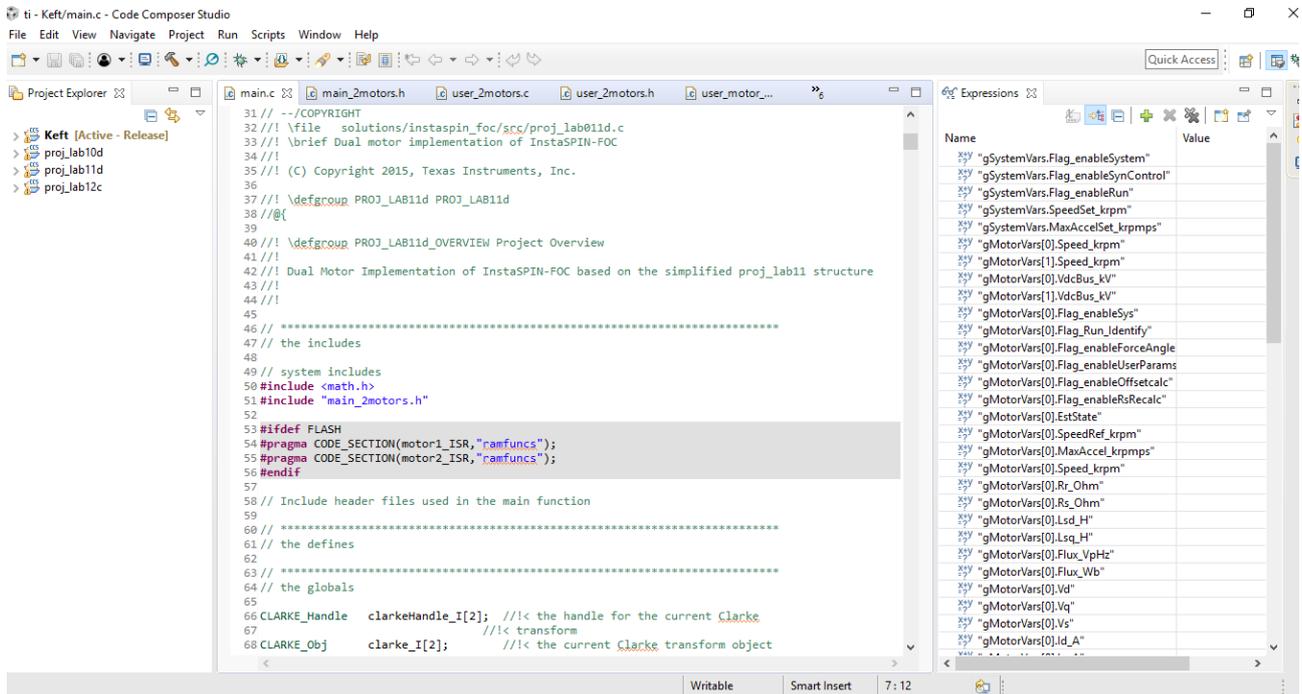


FIGURE 5.30 – Code Composer Studio

V.1.2) Installez le matériel :

Une fois Code Composer Studio installé, branchez le câble USB fourni sur la carte LaunchPad C2000 et sur un port USB disponible de votre ordinateur. Windows® détectera automatiquement le matériel et vous demandera d'installer des pilotes de logiciel. Laissez Windows rechercher les pilotes et les installer automatiquement. Une fois que Windows a installé avec succès les pilotes de l'émulateur XDS100v2 intégré, votre LaunchPad est maintenant prêt à être utilisé.

V.2) Bibliothèque MotorWare™

V.2.1) Description :

MotorWare™ est une Bibliothèque et la documentation permettant de développer des applications basées sur InstaSPIN-FOC™ et InstaSPIN-MOTION™ pour les séries F2802x, F2805x et F2806x.

V.2.2) Caractéristiques du logiciel :

- ❶ La technologie InstaSPIN-FOC apporte une technologie puissante de commande de moteur sans capteur orientée sur le terrain à tous les niveaux de compétence des concepteurs. InstaSPIN-FOC identifie, optimise et contrôle automatiquement les moteurs triphasés en quelques minutes.

❷ **InstaSPIN-MOTION** s'appuie sur la technologie InstaSPIN-FOC pour fournir un contrôle du mouvement robuste, vous permettant d'accélérer, de positionner et de planifier votre mouvement.

Plusieurs projets présentent diverses fonctionnalités de la solution InstaSPIN :

- Vérification du matériel et de la chaîne du signal.
- Identification du moteur.
- Calibrage avec compensation matérielle.
- Contrôle du couple et de la vitesse.
- Réglage du contrôle de vitesse.
- Suivi en ligne de la résistance du stator.
- Affaiblissement du champ.
- Sur-modulation.
- Départ lancé. Et Compensation de vibration.
- Hall de démarrage.
- Détection de la position initiale. Et Identification d'inertie.
- Vitesse avancée et réglage du contrôleur de position.
- Profils de mouvement.
- Séquencement et planification des mouvements.
- Commande de moteur double.
- Modulaire et portable pour MCU, électronique de puissance et techniques de contrôle.
- Conception de logiciels basée sur API orientée objet.
- Composants spéciaux d'identification et de réglage automatique pour un développement rapide du système.
- Contrôle de moteur sans capteur le plus robuste. Et du mouvement détecté avec les performances les plus élevées.

V.2.3) Architecture de la Bibliothèque MotorWare

La Bibliothèque MotorWare est illustrée à la Figure 5.31, qui contient trois composants logiciels principaux : l'interface utilisateur (c'est-à-dire l'IFACE), le contrôleur (c.-à-d. CTRL) et le Driver (c.-à-d. DRV)[31]. Chacun de ces composants peut être considéré comme ayant un ensemble spécifique et unique de tâches à effectuer. Chacun de ces composants contient les différents modules nécessaires au composant pour effectuer son ensemble de tâches. Cette structure modulaire constitue la base de la programmation orientée objet, dont nous traiterons plus loin dans ce chapitre.

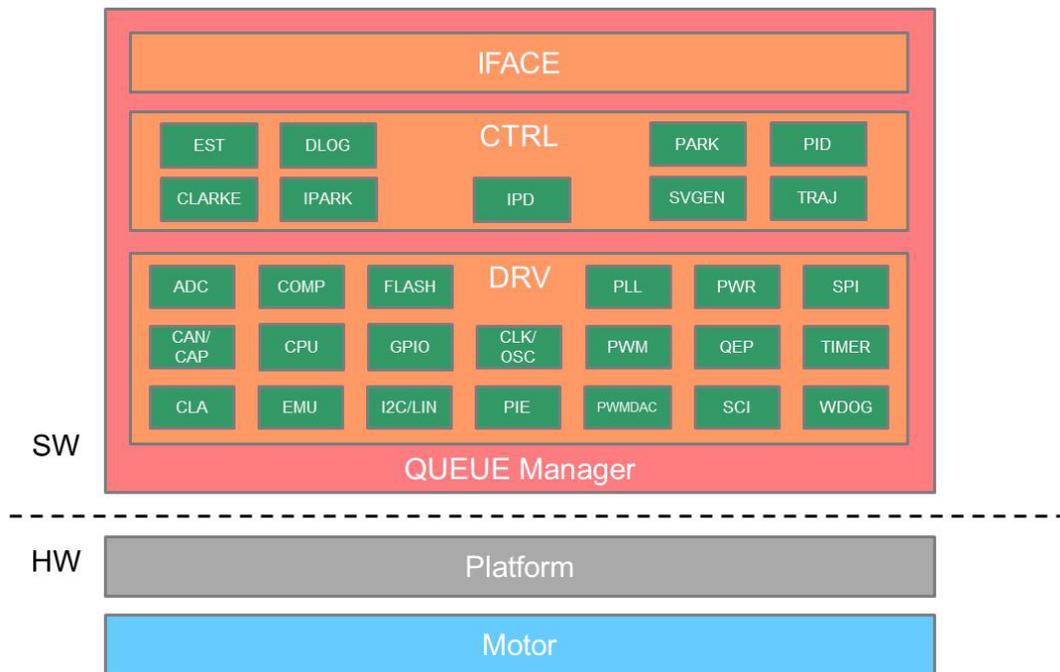


FIGURE 5.31 – MotorWare Software Stack

Le composant **IFACE** est un mécanisme permettant aux utilisateurs de saisir des paramètres dans le système de contrôle. Une interface graphique fonctionnant sur une machine hôte qui communique via un port série pour entrer les points de consigne souhaités en serait un exemple. Le composant **CTRL** contient tous les composants d'un système de contrôle numérique conventionnel. Le composant **DRV** contient tous les logiciels nécessaires à la configuration et au contrôle des composants matériels du système. Certaines architectures logicielles se réfèrent à cette couche en tant que **HAL** (Hardware Abstraction Layer). Dans l'implémentation la plus générale, le logiciel s'exécute à partir d'un gestionnaire de files d'attente qui exécute le système de contrôle en arrière-plan et donne la priorité aux ISR qui donnent des commandes aux modules PWM. Pour déterminer ces commandes, les données doivent être converties et le système de contrôle doit être exécuté à une fréquence inférieure ou égale au débit ISR[31].

Le matériel représenté sur la figure fait référence au kit de commande de moteur particulier et au processeur cible correspondant sur lequel le logiciel est exécuté, ainsi qu'au moteur pour lequel le logiciel a été configuré de manière appropriée.

V.3) Module de MotorWare™ Hardware Abstraction Layer (HAL)

V.3.1) introduction :

Le module HAL a pour objectif de permettre une base logicielle unifiée pouvant être portée sur plusieurs MCU (c-à-d. F2802x, f2805x et f2806x) et plates-formes matérielles (c-à-d. Boostxl-drv8301_revB, drv8301kit_revD, drv8312kit_revD et hvkit_rev1p1).[3]

V.3.2) Architecture de la Bibliothèque :

Le diagramme suivant montre comment l'objet HAL s'intègre dans l'architecture Bibliothèque, suivi de MotorWare :

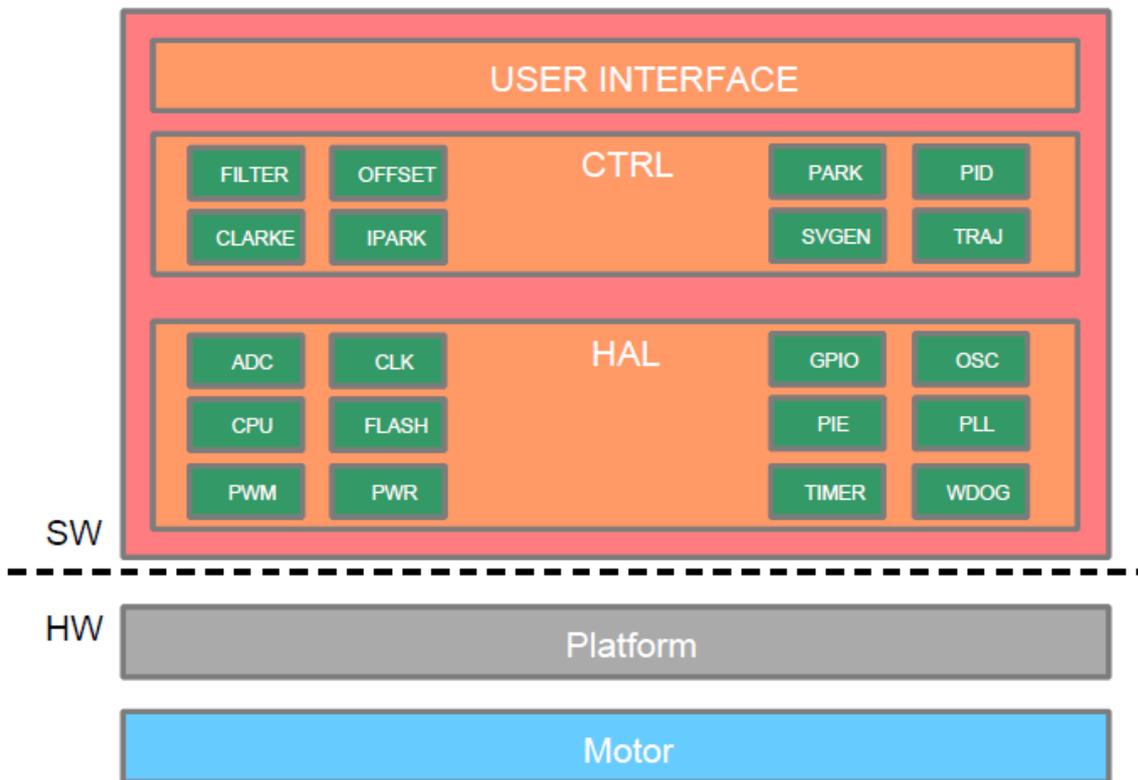


FIGURE 5.32 – intégration entre HAL et l'architecture logicielle.[3]

Certaines directives sont suivies par l'architecture actuelle, ce qui permet une meilleure utilisation d'un module HAL :

- Le module HAL est le seul module capable d'interfacer avec le matériel. Dans ce contexte, le matériel comprend les périphériques MCU et les fonctionnalités de la carte.
- Aucune configuration de périphérique ne doit être effectuée au niveau de l'interface utilisateur, car cela ne permet pas la portabilité du code.
- Les fonctions HAL qui sont critiques pour le temps doivent être intégrées pour une exécution plus rapide.
- L'utilisation de macros doit être évitée et l'utilisation de fonctions en ligne doit être utilisée à la place.

V.3.3) Définition d'objet :

Il existe plusieurs définitions d'objet du module HAL, en fonction de la combinaison processeur / carte. La définition d'objet du module HAL se trouve dans l'arborescence des produits MotorWare.[3]

```

1  //! \brief Defines the hardware abstraction layer (HAL) data
2  //! \details The HAL object contains all handles to peripherals. When
   accessing a
3  //! peripheral on a processor, use a HAL function along with the HAL handle

```

```

4  //! for that processor to access its peripherals.
5  //!
6  typedef struct _HAL_Obj_
7  {
8  ADC_Handle adcHandle; //!< the ADC handle
9  CLK_Handle clkHandle; //!< the clock handle
10 CPU_Handle cpuHandle; //!< the CPU handle
11 FLASH_Handle flashHandle; //!< the flash handle
12 GPIO_Handle gpioHandle; //!< the GPIO handle
13 OFFSET_Handle offsetHandle_I[3]; //!< the handles for the current offset
    estimators
14 OFFSET_Obj offset_I[3]; //!< the current offset objects
15 OFFSET_Handle offsetHandle_V[3]; //!< the handles for the voltage offset
    estimators
16
17 OFFSET_Obj offset_V[3]; //!< the voltage offset objects
18 OSC_Handle oscHandle; //!< the oscillator handle
19 PIE_Handle pieHandle; //!< the PIE handle
20 PLL_Handle pllHandle; //!< the PLL handle
21 PWM_Handle pwmHandle[3]; //!< the PWM handles
22 PWMDAC_Handle pwmDacHandle[3]; //!< the PWMDAC handles
23 PWR_Handle pwrHandle; //!< the power handle
24 TIMER_Handle timerHandle[3]; //!< the timer handles
25 WDOG_Handle wdogHandle; //!< the watchdog handle
26 HAL_AdcData_t adcBias; //!< the ADC bias
27 _iq current_sf; //!< the current scale factor, amps_pu/cnt
28 _iq voltage_sf; //!< the voltage scale factor, volts_pu/cnt
29 uint_least8_t numCurrentSensors; //!< the number of current sensors
30 uint_least8_t numVoltageSensors; //!< the number of voltage sensors
31 #ifdef
32 QEP QEP_Handle qepHandle[2]; //!< the QEP handle
33 #endif
34 } HAL_Obj;
35

```

Comme on peut le constater, la définition d'objet HAL est une combinaison de nombre de modules par périphérique et de modules liés à une plate-forme particulière. Par exemple, il n'y a qu'un seul module ADC que nous devons configurer via le module HAL, nous n'incluons donc qu'un seul module ADC :

```

1  ADC_Handle adcHandle; //!< the ADC handle
2

```

Et il y a trois paires de PWM que nous devons configurer, nous en ajoutons donc trois :

```

1  PWM_Handle pwmHandle[3]; //!< the PWM handles
2

```

De plus, en relation avec la plate-forme, le paramètre HAL suivant aura le nombre de capteurs de courant :

```

1  uint_least8_t numCurrentSensors; //!< the number of current sensors
2

```

V.3.4) HAL Global Variables :

Les variables globales suivantes sont déclarées dans un projet MotorWare associé au module HAL dans proj_labxx.c :

```

1  // the globals
2  HAL_Handle halHandle;
3  HAL_PwmData_t gPwmData = {_IQ(0.0), _IQ(0.0), _IQ(0.0)};
4  HAL_AdcData_t gAdcData;
5

```

Et l'objet global HAL déclaré dans hal.c :

```

1  // the globals
2  HAL_Obj hal;
3

```

V.3.5) Configuration HAL :

Dans un projet MotorWare, il existe plusieurs fonctions HAL appelées une seule fois, liées à la configuration du matériel. Il y'a des projets qui prennent Toutes ces fonctions traitent de la configuration d'un périphérique ou d'un pilote.[3]

Les états suivante récapitule les appels de fonction de configuration HAL :

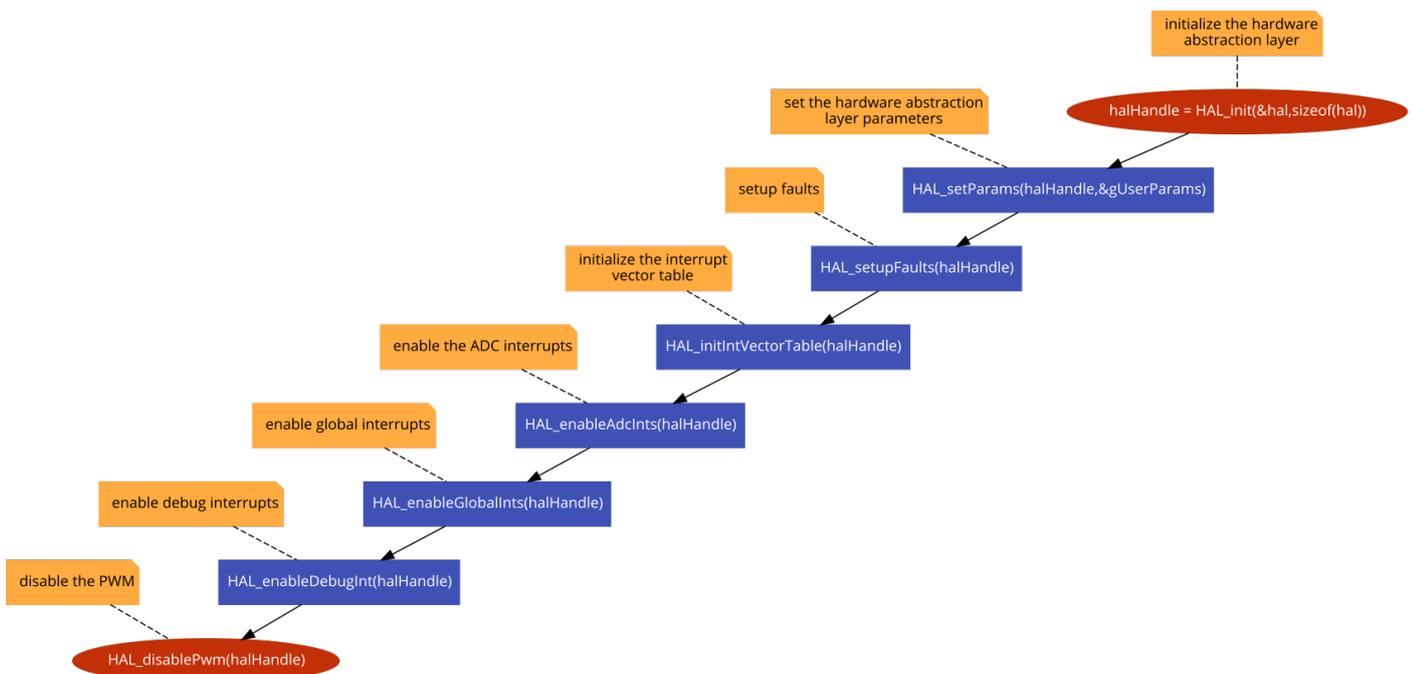


FIGURE 5.33 – Configuration HAL

V.4) Logiciel MotorControl (SDK) pour MCU C2000™

V.4.1) Description :

Les microcontrôleurs (MCU) MotorControl SDK pour C2000™ constituent un ensemble cohérent d'infrastructures logicielles, d'outils et de documentation conçus pour minimiser le temps de développement du système de contrôle moteur basé sur le MCU C2000 et ciblé pour diverses applications de contrôle moteur triphasé. Le logiciel comprend un micrologiciel fonctionnant sur les modules EVM C2000. MotorControl SDK fournit toutes les ressources nécessaires à chaque étape du développement et de l'évaluation pour des performances élevées. applications de contrôle moteur. Une copie de C2000Ware est fournie avec le SDK. Elle offre donc des drivers et des logiciels de support spécifiques à chaque périphérique pour compléter des exemples d'applications système sophistiquées.[32]

V.4.2) Caractéristiques :

Répertoire de logiciels complet pour les applications de contrôle de moteur C2000 MCU.

InstaSPIN-FOC : solutions FOC sans capteur :

- Contrôle sans capteur ou contrôle de champ de vitesse.
- Observateur logiciel FAST™ pour des estimations de flux, d'angle, de vitesse et de couple de rotor de qualité supérieure.
- Identification du paramètre moteur.
- Réglage automatique de la boucle d'observateur et de contrôle de couple.
- Performances optimales pour les applications à faible vitesse et très dynamiques.

DesignDRIVE : solutions FOC Sensored :

- Vitesse détectée ou commande orientée champ de position.
- Retour de position : encodeurs résolveur, incrémental et absolu.
- Techniques de détection de courant : shunt côté bas, échantillonnage de courant en ligne et démodulation de filtres sigma-delta.
- Boucle de courant rapide (FCL) : bibliothèque de logiciels optimisée qui tire pleinement parti des ressources matérielles pour accélérer l'échantillonnage, le traitement et l'activation du système afin d'obtenir la bande passante de contrôle la plus élevée pour une fréquence PWM donnée dans les applications de servocommande.
- Exemples de connectivité en temps réel.

VI) Partie Contrôle "Programme"

Présentation du produit InstaSPIN-FOC et InstaSPIN-MOTION sont des solutions FOC sans capteur ou détectées qui identifient, règlent et contrôlent le moteur en quelques minutes. Les deux solutions comprennent :

VI.1) Norme de codage

Cette partie contient les normes de codage pour le code C. Il s'agit d'un mécanisme permettant de créer des logiciels de structure et de fonctionnalité uniformes. Bien que chaque programmeur ait son propre style de codage, le but de ces instructions est de standardiser les éléments suivants.

Noms de variables :

- Toutes les variables sont des cas de chameaux commençant par une lettre minuscule. Les variables globales doivent commencer par la lettre « g ». Par exemple `uint16_t loopCounter ;` `uint16_t gDataBuffer.`
- Les définitions de type doivent commencer par le nom du module en lettres majuscules, suivi d'un trait de soulignement (« _ »). Par exemple. `MODULE_FruitTypes.`
- Les constantes définies doivent être en majuscules et commencer par le nom du module. Par exemple. `#define MODULE_REGISTER_BIT (1 << 4).`

Noms de fonction :

- Toutes les fonctions doivent commencer par le nom du module en lettres majuscules, suivi d'un trait de soulignement (« _ »).
- Après le trait de soulignement, les noms des fonctions doivent être composés d'une casse de chameau commençant par une lettre minuscule et commençant par un verbe décrivant l'action de la fonction. Par exemple. `UART_putChar () ; PWM_setPeriod () ; TIMER_getValue () ;`

Commentaires :

- Tous les commentaires doivent utiliser le délimiteur de commentaire à une ligne «//» et doivent être mis en retrait au même niveau du code qu'ils documentent.

Prototypes de fonction :

- Toutes les fonctions doivent être prototypées dans le fichier d'en-tête correspondant du module.

- Toutes les déclarations de fonction doivent contenir le mot-clé externe. Toutes les fonctions en ligne doivent être statiques.
- Les prototypes doivent inclure des commentaires Doxygen. Voir l'exemple de fichier d'en-tête en annexe pour plus de détails.

Indentation :

- Chaque niveau d'indentation est de quatre (4) espaces et tous les espaces blancs ne contiennent que des espaces (c'est-à-dire sans tabulations).
- Les lignes continues doivent être en retrait de huit (8) espaces.

Structure du fichier :

- Tous les logiciels d'un fichier doivent résider dans l'une des sections suivantes. Les sections doivent apparaître dans l'ordre suivant dans un fichier - en-tête, inclut, définit, typedefs, globals, prototypes de fonctions. Voir l'exemple de fichier d'en-tête en annexe pour plus de détails.

Types de données :

- `bool_t` pour les valeurs booléennes.
- Types C99 pour les autres : `(u) int_leastX_t` (portable), `(u) int_fastX_t` (spécifique à l'architecture) et `(u) intX_t` (spécifique à l'architecture), où X est 8, 16, 32 et 64.

Définitions de macro :

- Seules les macros à une ligne sont autorisées. Les fonctions en ligne doivent être utilisées pour optimiser les fonctions.

Les noms de fichiers doivent respecter les conventions de dénomination des fonctions.

Noms de fichiers C :

1. L'extension du nom du fichier source doit être `*.c`
2. L'extension du nom du fichier d'en-tête doit être `*.h`

Fichiers d'en-tête :

1. Toutes les fonctions publiques d'un fichier source doivent avoir des prototypes de fonctions dans un fichier d'en-tête du même nom.

Types de données :

1. Les types de données suivants doivent être utilisés pour développer du code portable. Lorsqu'il est défini, le type de données de la norme C99 [1] est utilisé. Pour les nombres fractionnaires signés, un style de type de données similaire au style entier C99 a été défini.

Type Name	Description
bool_t	Une seule valeur booléenne
char	Un caractère
int_least8_t	Un entier signé d'une largeur d'au moins 8 bits
uint_least8_t	Un entier non signé d'une largeur d'au moins 8 bits
int_least16_t	Un E signé d'une largeur d'au moins 16 bits
uint_least16_t	Un E non signé d'une largeur d'au moins 16 bits
int_least32_t	Un E signé d'une largeur d'au moins 32 bits
uint_least32_t	Un E non signé d'une largeur d'au moins 32 bits
int_least64_t	Un E signé d'une largeur d'au moins 64 bits
uint_least64_t	Un E non S d'une largeur d'au moins 64 bits
int_fast8_t	Le N.E.S le plus rapide avec une largeur d'au moins 8 bits
uint_fast8_t	Le N.E non S le plus rapide avec une largeur d'au moins 8 bits
int_fast16_t	Le N.E S le plus rapide avec une largeur d'au moins 16 bits
uint_fast16_t	Le N.E non S le plus rapide d'une largeur d'au moins 16 bits
int_fast32_t	Le N.E S le plus rapide avec une largeur d'au moins 32 bits
uint_fast32_t	Le N.E non S le plus rapide d'une largeur d'au moins 32 bits
int_fast64_t	Le N.E S le plus rapide avec une largeur d'au moins 64 bits
uint_fast64_t	Le N.E non S le plus rapide avec une largeur d'au moins 64 bits
float16_t	Un N fractionnaire signé avec au moins 16 bits de précision
float32_t	Un N fractionnaire signé avec au moins 32 bits de précision
float64_t	Un N fractionnaire signé avec au moins 64 bits de précision
float128_t	Un N fractionnaire signé avec au moins 128 bits de précision

N : Nombre.

E : Entier.

S : Signé.

1. La définition suivante doit être utilisée pour les valeurs booléennes :

```

1  typedef struct _cplx_least16_t_
2  {
3  int_least16_t imag;
4  int_least16_t real;
5  } cplx_least16_t
6

```

2. Les définitions suivantes doivent être utilisées pour des valeurs de données complexes :

```

1  typedef struct _cplx_least32_t_
2  {
3  int_least32_t imag;
4  int_least32_t real;
5  } cplx_least32_t
6

```

VI.2) Aperçu Notre Lab Projects

Comme nous l'avons cité ci-dessous que *InstaSPIN-FOC* et *InstaSPIN-MOTION* sont des solutions FOC avec et sans capteur qui identifient, règlent et contrôlent un moteur en quelques minutes.

Les exemples de projets qui existe nous permettent non seulement d'expérimenter avec *InstaSPIN*, mais également de nous en servir comme référence pour notre conception.

Ces projets nous aideront à développer un produit performant. Les solutions de commande de moteur *InstaSPIN-FOC* et *InstaSPIN-MOTION*, sont livrés dans **MotorWare**. Pour obtenir une liste complète des fonctions de l'API, des normes de codage des logiciels et de l'architecture de MotorWare, exécutez *MotorWare.exe* à partir de la dernière version installée.[4]

Ex : C : ti motorware motorware_1_01_00_15 MotorWare.exe Dans Lab Projects "les projets de laboratoire", vous apprendrez à modifier **user.h**, le fichier qui stocke tous les paramètres utilisateur. Certains de ces paramètres peuvent être manipulés via l'interface graphique ou **CCS** lors de l'exécution, mais ils doivent être mis à jour dans *user.h* pour être enregistrés de manière permanente dans votre projet.

Dans le fichier InstaSPIN Projects and Labs User's Guide [4] il y a un tableau QUI récapitule tous les projets disponibles, ainsi que les projets s'appliquant à quelles cartes et à quel périphérique cible.

Les exemples qui se rapprochent de notre étude sont *Lab11d* (sensorless) et *Lab12c* (sensored)

Solution	Name	drv8301kit drv8312kit hvkit			boost8301 boost8305		Brief Description
		2x	5x	6x	2x	6x	
...	...						
FOC	Lab11d					✓	Dual Motor Sensorless Velocity Control
...	...						
MOTION	Lab12c					✓	Dual Motor Sensored Velocity Control

FIGURE 5.34 – Lab projects. [4]

VI.3) Partie Sans Codeur Incrementale " Sensorless " :

Dans la partie suivante, les mots "Handle" et "Obj" sont beaucoup utilisés, donc l'explication est ci-dessous :

Handles : Handles sont utilisés pour référencer des objets. Les fonctions doivent transmettre les descripteurs (Handles) aux objets et non les objets eux-mêmes (ni les pointeurs sur les objets). Handles ne sont rien de plus que des pointeurs abstraits sur des objets, sans la surcharge supplémentaire de frappe et d'interprétation de la syntaxe du pointeur. Cependant, l'utilisation de descripteur rend le code beaucoup plus lisible et compréhensible par la plupart des programmeurs, tous les descripteurs sont initialisés en appelant la méthode `init()` d'un objet. De sa conception, chaque objet doit avoir une méthode `init()`.^[31]

Objects : Un objet n'est rien d'autre qu'un ensemble de paramètres et de méthodes associées (fonctions) nécessaires à l'exécution des tâches qui définissent l'objet. Par exemple, un objet de filtre contiendrait les coefficients de filtre nécessaires à la mise en œuvre de l'opération de filtrage, ainsi que toutes les valeurs de données intermédiaires nécessaires au filtre pour calculer la valeur de sortie souhaitée. Il ne contiendrait toutefois pas les paramètres nécessaires pour effectuer une seconde opération telle que l'écriture logicielle orientée objet produit également un code plus efficace, réutilisable et maintenable. Les objets peuvent être réutilisés d'une application à l'autre et leur maintenance est plus simple car il s'agit de composants plus petits, indépendants et généralement bien définis (qui se traduisent par des propriétés bien définies).

Inclure les fichiers d'en-tête utilisés dans la fonction principale :

```
1 // the includes
2 // system includes
3 #include <math.h>
4 #include "main_2motors.h"
5
```

Déclaration des variables globales :

```
1 // *****
2 // the globals
3 // La reference de courant et tension pour la transformation de clarke
4 CLARKE_Handle   clarkeHandle_I [2];
5 CLARKE_Handle   clarkeHandle_V [2];
6
7 // the current and voltage clarke transform object
8 CLARKE_Obj      clarke_V [2];
9 CLARKE_Obj      clarke_I [2];
10
11 // La reference d estimateur
12 EST_Handle      estHandle [2];
13
14 // Les trois objets pour les controleurs PID 0 – speed , 1 – Id , 2 – Iq
15 PID_Obj         pid [2][3];
16 PID_Handle      pidHandle [2][3];
```

```

17  uint16_t      pidCntSpeed [2];
18
19  // La reference de park inverse
20  IPARK_Handle  iparkHandle [2];
21  IPARK_Obj     ipark [2];
22
23  // reference id et son object
24  TRAJ_Handle   trajHandle_Id [2];
25  TRAJ_Obj     traj_Id [2];
26
27  // La reference de vitesse son object
28  TRAJ_Handle   trajHandle_spd [2];
29  TRAJ_Obj     traj_spd [2];
30
31  // reference pour la compensation d'angle et son object
32  ANGLE_COMP_Handle  angleCompHandle [2];
33  ANGLE_COMP_Obj     angleComp [2];
34
35  // la couche d'abstraction materielle specifique a la carte du moteur.
36  HAL_Handle_mtr  halHandleMtr [2];
37  HAL_Obj_mtr    halMtr [2];
38
39  // valeurs de pwm pour chaque phase
40  HAL_PwmData_t  gPwmData [2] = { {_IQ(0.0) , _IQ(0.0) , _IQ(0.0) } ,
41                                  { _IQ(0.0) , _IQ(0.0) , _IQ(0.0) } };
42
43  // contient 3 valeurs de courant , 3 valeurs de tension et une valeur de DC buss
44  HAL_AdcData_t  gAdcData [2];
45
46  USER_Params   gUserParams [2];
47
48  // la variables du moteur global est definies dans main.h
49  volatile MOTOR_Vars_t gMotorVars [2] = {MOTOR_Vars_INIT_Mtr1 ,
50      MOTOR_Vars_INIT_Mtr2};
51  volatile SYSTEM_Vars_t gSystemVars = SYSTEM_Vars_INIT;
52
53  uint16_t gCounter_updateGlobals [2] = {0, 0};
54  uint16_t gTrjCnt [2] = {0, 0};
55
56  _iq gFlux_pu_to_Wb_sf [2];
57  _iq gFlux_pu_to_VpHz_sf [2];
58  _iq gTorque_Ls_Id_Iq_pu_to_Nm_sf [2];
59  _iq gTorque_Flux_Iq_pu_to_Nm_sf [2];
60  _iq gSpeed_krpm_to_pu_sf [2];
61  _iq gSpeed_hz_to_krpm_sf [2];
62  _iq gId_MinValue [2];
63  _iq gId_MaxDelta [2];
64  _iq gId_RsEst [2];

```

Remark 1

Notre projet comprend plusieurs fichiers, chaque fichier contient plus 1500 lignes donc dans cette partie je vais faire prendre, citer et expliquer les fonctions et les instructions en global,

Le projet se retrouve dans la destination (après installer MotorWare)

file solutions/instaspin_motion/src/proj_lab12c.c

file solutions/instaspin_motion/src/proj_lab11d.c

La fonction Principale void main(void)

Dans la fonction void main() je vais citer quelques instructions et des fonctions tel que PWM, ADC, E/S, SPI, communication avec l'EVM8305, codeur Incrémental...

❶ initialisation des paramètres utilisateur : Cette fonction initialise toutes les valeurs de la structure gUserParams avec les valeurs définies dans user.h. Les valeurs de gUserParams seront ensuite utilisées par la couche HAL pour configurer les périphériques tels que PWM, ADC, les interruptions, etc.

```
1 USER_setParamsMtr1(&gUserParams[HAL_MTR1]);
2 USER_setParamsMtr2(&gUserParams[HAL_MTR2]);
```

❷ communication avec les classes des bibliothèques InstaSpin : initialiser l'estimateur via le contrôleur. Ces trois appels de fonction sont nécessaires pour l'implémentation de InstaSPIN pour F2806xF / M.

```
1 CTRL_setParams(ctrlHandle,&gUserParams[mtrNum]);
2 CTRL_setUserMotorParams(ctrlHandle);
3 CTRL_setupEstIdleState(ctrlHandle);
```

❸ communication avec l'EVM8305 : Si l'onduleur DRV8305 est present alors faire l'initialisation de l'interface du DRV8305

```
1 #ifdef DRV8305_SPI
2 // turn on the DRV8305 if present
3 HAL_enableDrv(halHandleMtr[mtrNum]);
4 // initialize the DRV8305 interface
5 HAL_setupDrvSpi(halHandleMtr[mtrNum],&gDrvSpi8305Vars[mtrNum]);
6 #endif
```

❹ initialise le module encodeur :

j'initialise le codeur incrémentale

```
1 encHandle[mtrNum] = ENC_init(&enc[mtrNum], sizeof(enc[mtrNum]));
```

initialisation les modules Clarke, PID controllers, vecteur spatial :

```
1 clarkeHandle_l[mtrNum]=CLARKE_init(&clarke_l[mtrNum], sizeof(clarke_l[mtrNum]));
2 clarkeHandle_v[mtrNum]=CLARKE_init(&clarke_v[mtrNum], sizeof(clarke_v[mtrNum]));
3
4 pidSetup((HAL_MtrSelect_e)mtrNum);
5
6 iparkHandle[mtrNum] = IPARK_init(&ipark[mtrNum], sizeof(ipark[mtrNum]));
7
8 svgenHandle[mtrNum] = SVGEN_init(&svgen[mtrNum], sizeof(svgen[mtrNum]));
```

La routine du deuxième moteur MTR2 qui fonctionne sans capteur (Sensorless)

Déclaration des variables locales, timer 2 et le module d'utilisation du CPU. Abaisse le drapeau d'interruption dans la routine de service d'interruption de l'ADC dont le nom est motor2-ISR. La lecture de la valeur du timer afin de calculer à la fin pour l'ISR, le temp totale d'exécution de l'ISR et de voir s'il y a eu dépassement. La lecture donnée de l'ADC avec correcteur de l'offset lancer l'estimateur qui utilise La référence de vitesse qui est nécessaire pour que le signe correct de l'angle forcé soit calculé. L'estimateur ne fait pas l'ID de moteur, seul le signe de la référence de vitesse est utilisé. Générer l'angle électrique du moteur et récupère l'idq de l'estimateur pour éviter sin et cos. Transformée de Park, qui économise les cycles du processeur

```
1 interrupt void motor2_ISR(void)
2 {
3   _iq angle_pu = _IQ(0.0);
4   _iq speed_pu = _IQ(0.0);
5   _iq oneOverDcBus;
6   MATH_vec2 lab_pu;
7   MATH_vec2 Vab_pu;
8   MATH_vec2 phasor;
9
10  uint32_t timer1Cnt = HAL_readTimerCnt(halHandle,2);
11  CPU_TIME_updateCnts(cpu_timeHandle[HAL_MTR2],timer1Cnt);
12
13  HAL_acqAdcInt(halHandle,ADC_IntNumber_2);
14
15  HAL_readAdcDataWithOffsets(halHandle,halHandleMtr[HAL_MTR2],&gAdcData[HAL_MTR2])
16  ;
17  gAdcData[HAL_MTR2].I.value[0] = gAdcData[HAL_MTR2].I.value[0] - gOffsets_I_pu[
18  HAL_MTR2].value[0];
19  gAdcData[HAL_MTR2].I.value[1] = gAdcData[HAL_MTR2].I.value[1] - gOffsets_I_pu[
20  HAL_MTR2].value[1];
21  gAdcData[HAL_MTR2].I.value[2] = gAdcData[HAL_MTR2].I.value[2] - gOffsets_I_pu[
22  HAL_MTR2].value[2];
23  gAdcData[HAL_MTR2].V.value[0] = gAdcData[HAL_MTR2].V.value[0] - gOffsets_V_pu[
24  HAL_MTR2].value[0];
25  gAdcData[HAL_MTR2].V.value[1] = gAdcData[HAL_MTR2].V.value[1] - gOffsets_V_pu[
26  HAL_MTR2].value[1];
27  gAdcData[HAL_MTR2].V.value[2] = gAdcData[HAL_MTR2].V.value[2] - gOffsets_V_pu[
28  HAL_MTR2].value[2];
29
30  CLARKE_run(clarkeHandle_I[HAL_MTR2],&gAdcData[HAL_MTR2].I,&lab_pu);
31  CLARKE_run(clarkeHandle_V[HAL_MTR2],&gAdcData[HAL_MTR2].V,&Vab_pu);
32
33  TRAJ_run(trajHandle_Id[HAL_MTR2]);
34
35  EST_run(estHandle[HAL_MTR2],&lab_pu,&Vab_pu,gAdcData[HAL_MTR2].dcBus,
36  TRAJ_getIntValue(trajHandle_spd[HAL_MTR2]));
```

```

30
31 angle_pu = EST_getAngle_pu(estHandle[HAL_MTR2]) ;
32 speed_pu = EST_getFm_pu(estHandle[HAL_MTR2]) ;
33
34 EST_getIdq_pu(estHandle[HAL_MTR2], &gIdq_pu[HAL_MTR2]) ;

```

Lancer le régulateur approprié et faire la Déclaration des variables locales.

Réinitialisez le compteur d'exécution du PID de vitesse. Pour que L'instruction PID_run_spd exécute le régulateur de vitesse PI et place sa sortie dans Idq_ref_pu.value [1], qui est la valeur de référence d'entrée pour le régulateur de courant pour axe q.

ensuite on exécute l'instruction qui permet aux contrôleur de courant PI pour l'axe d et place sa sortie dans Vdq_pu.value [0], qui correspond à la tension de commande sur l'axe d (Vd).

Après obtention la valeur de référence Iq, on met la référence Iq à zéro lors du recalcul de Rs et obtient la valeur réelle de ce courant Iq

Les limites de tension à la sortie du contrôleur de courant de l'axe q sont dynamiques et dépendent de la tension de sortie du contrôleur de courant de l'axe d. En d'autres termes, le contrôleur de courant d'axe d obtient les premiers d'bits sur la tension disponible et le contrôleur de courant d'axe q récupère ce qui reste. C'est pourquoi le contrôleur de courant d'axe d s'exécute en premier. L'instruction suivante calcule les limites maximales pour cette tension comme suit : // $Vq_min_max = +/- \sqrt{(Vbus \hat{=} - Vd \hat{=})}$

même étape que le premier faire exécuter l'instruction de contrôleur de courant PI pour l'axe q et place sa sortie dans Vdq_pu.value [1], qui est le vecteur de tension de commande sur l'axe q (Vq).

Le vecteur de tension est maintenant calculé et prêt à être appliqué au moteur sous la forme de trois signaux PWM. Cependant, même si les tensions peuvent être fournies au module PWM maintenant, elles ne seront pas appliquées au moteur avant le cycle PWM suivant. À ce stade, le moteur s'est éloigné de l'angle pour lequel le vecteur de tension a été calculé, d'une quantité proportionnelle à la fréquence d'échantillonnage et à la vitesse du moteur. Pour les vitesses stables, nous pouvons calculer ce retard angulaire et le compenser.

Calcule les valeurs de phasor sinus et cosinus qui font partie des calculs de transformée de Park inverse. Une fois ces valeurs calculées, elles sont copiées dans le module IPARK, qui les utilise ensuite pour transformer les tensions de cadres de référence dq en cadres de référence Alpha / Beta. Les 3 instructions de PWM compensent les variations du DC bus en ajustant le rapport cyclique PWM. L'objectif est d'obtenir le même produit volt-seconde quelle que soit la valeur du bus continu. Pour ce faire, il faut diviser les valeurs de tension souhaitées par la valeur du bus continu. Ou ... il est plus facile de multiplier par $1 / (\text{valeur du bus continu})$.

```

1 if (gMotorVars[HAL_MTR2].Flag_Run_Identify || (gMotorVars[HAL_MTR2].
   Flag_enableRsRecalc))
2 {
3   _iq_refValue ;
4   _iq_fbackValue ;
5   _iq_outMax_pu ;
6

```

```

7  if (( pidCntSpeed [HAL_MTR2]++ >= gUserParams [HAL_MTR1] . numCtrlTicksPerSpeedTick ) \
8  && (! gMotorVars [HAL_MTR2] . Flag_ enableRsRecalc ) )
9  {
10 pidCntSpeed [HAL_MTR2] = 0;
11
12 PID_ run_ spd( pidHandle [HAL_MTR2] [0] , TRAJ_ getIntValue( trajHandle_ spd [HAL_MTR2] ) ,
13   speed_ pu ,
14   &(gldq_ ref_ pu [HAL_MTR2] . value [1] ) ) ;
15 }
16 refValue = TRAJ_ getIntValue( trajHandle_ ld [HAL_MTR2] ) ;
17
18 fbackValue = gldq_ pu [HAL_MTR2] . value [0] ;
19
20 PID_ run( pidHandle [HAL_MTR2] [1] , refValue , fbackValue , &(gVdq_ out_ pu [HAL_MTR2] . value
21   [0] ) ) ;
22
23 refValue = gldq_ ref_ pu [HAL_MTR2] . value [1] ;
24
25 if ( gMotorVars [HAL_MTR2] . Flag_ enableRsRecalc ) gldq_ ref_ pu [HAL_MTR2] . value [1] =
26   _IQ( 0.0 ) ;
27
28 fbackValue = gldq_ pu [HAL_MTR2] . value [1] ;
29
30 _iq_ max_ vs = _IQmpy( _IQ( USER_ MAX_ VS_ MAG_ PU_ M2 ) , EST_ getDcBus_ pu( estHandle [
31   HAL_MTR2] ) ) ;
32
33 outMax_ pu = _IQsqrt( _IQmpy( max_ vs , max_ vs )
34   - _IQmpy( gVdq_ out_ pu [HAL_MTR2] . value [0] , gVdq_ out_ pu [HAL_MTR2] . value [0] ) ) ) ;
35
36 PID_ setMinMax( pidHandle [HAL_MTR2] [2] , -outMax_ pu , outMax_ pu ) ;
37
38 PID_ run( pidHandle [HAL_MTR2] [2] , refValue , fbackValue , &(gVdq_ out_ pu [HAL_MTR2] . value
39   [1] ) ) ;
40
41
42 ANGLE_ COMP_ run( angleCompHandle [HAL_MTR2] , speed_ pu , angle_ pu ) ;
43
44 angle_ pu = ANGLE_ COMP_ getAngleComp_ pu( angleCompHandle [HAL_MTR2] ) ;
45
46
47 phasor . value [0] = _IQcosPU( angle_ pu ) ;
48
49 phasor . value [1] = _IQsinPU( angle_ pu ) ;
50
51
52 IPARK_ setPhasor( iparkHandle [HAL_MTR2] , &phasor ) ;
53
54
55 IPARK_ run( iparkHandle [HAL_MTR2] , &gVdq_ out_ pu [HAL_MTR2] , &Vab_ pu ) ;
56
57
58 oneOverDcBus = EST_ getOneOverDcBus_ pu( estHandle [HAL_MTR2] ) ;
59
60 Vab_ pu . value [0] = _IQmpy( Vab_ pu . value [0] , oneOverDcBus ) ;
61
62 Vab_ pu . value [1] = _IQmpy( Vab_ pu . value [1] , oneOverDcBus ) ;
63
64
65
66 SVGEN_ run( svgenHandle [HAL_MTR2] , &Vab_ pu , &(gPwmData [HAL_MTR2] . Tabc ) ) ;
67
68
69
70

```

```

51 gTrjCnt[HAL_MTR2]++;
52 }
53 else if(gMotorVars[HAL_MTR2].Flag_enableOffsetcalc == true)
54 {
55 runOffsetsCalculation(HAL_MTR2);
56 }
57 else // gMotorVars.Flag_Run_Identify = 0
58 {
59 // disable the PWM
60 HAL_disablePwm(halHandleMtr[HAL_MTR2]);
61
62 // Set the PWMs to 50% duty cycle
63 gPwmData[HAL_MTR2].Tabc.value[0] = _IQ(0.0);
64 gPwmData[HAL_MTR2].Tabc.value[1] = _IQ(0.0);
65 gPwmData[HAL_MTR2].Tabc.value[2] = _IQ(0.0);
66 }
67
68 // write to the PWM compare registers , and then we are done!
69 HAL_writePwmData(halHandleMtr[HAL_MTR2],&gPwmData[HAL_MTR2]);
70
71 if(gTrjCnt[HAL_MTR2] >= gUserParams[HAL_MTR2].numCtrlTicksPerTrajTick)
72 {
73 // clear counter
74 gTrjCnt[HAL_MTR2] = 0;
75
76 // run a trajectory for speed reference , so the reference changes with a ramp
    instead of a step
77 TRAJ_run(trajHandle_spd[HAL_MTR2]);
78 }
79
80 // read the timer 2 value and update the CPU usage module
81 timer1Cnt = HAL_readTimerCnt(halHandle,2);
82 CPU_TIME_run(cpu_timeHandle[HAL_MTR2],timer1Cnt);
83
84 return;
85 } // end of motor2_ISR() function

```

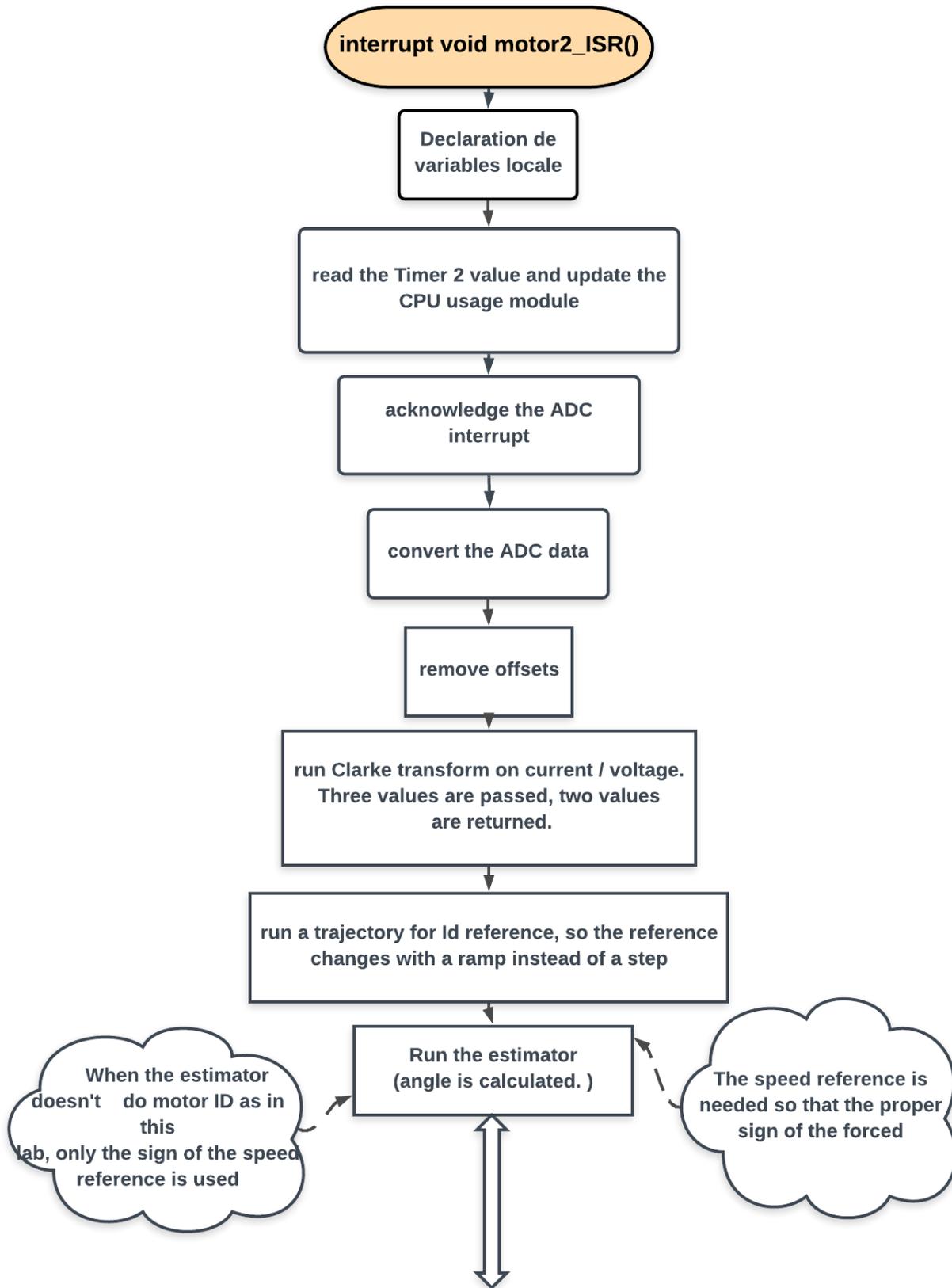


FIGURE 5.35 – Diagramme1 De La partie Sans capteur (moteur2)

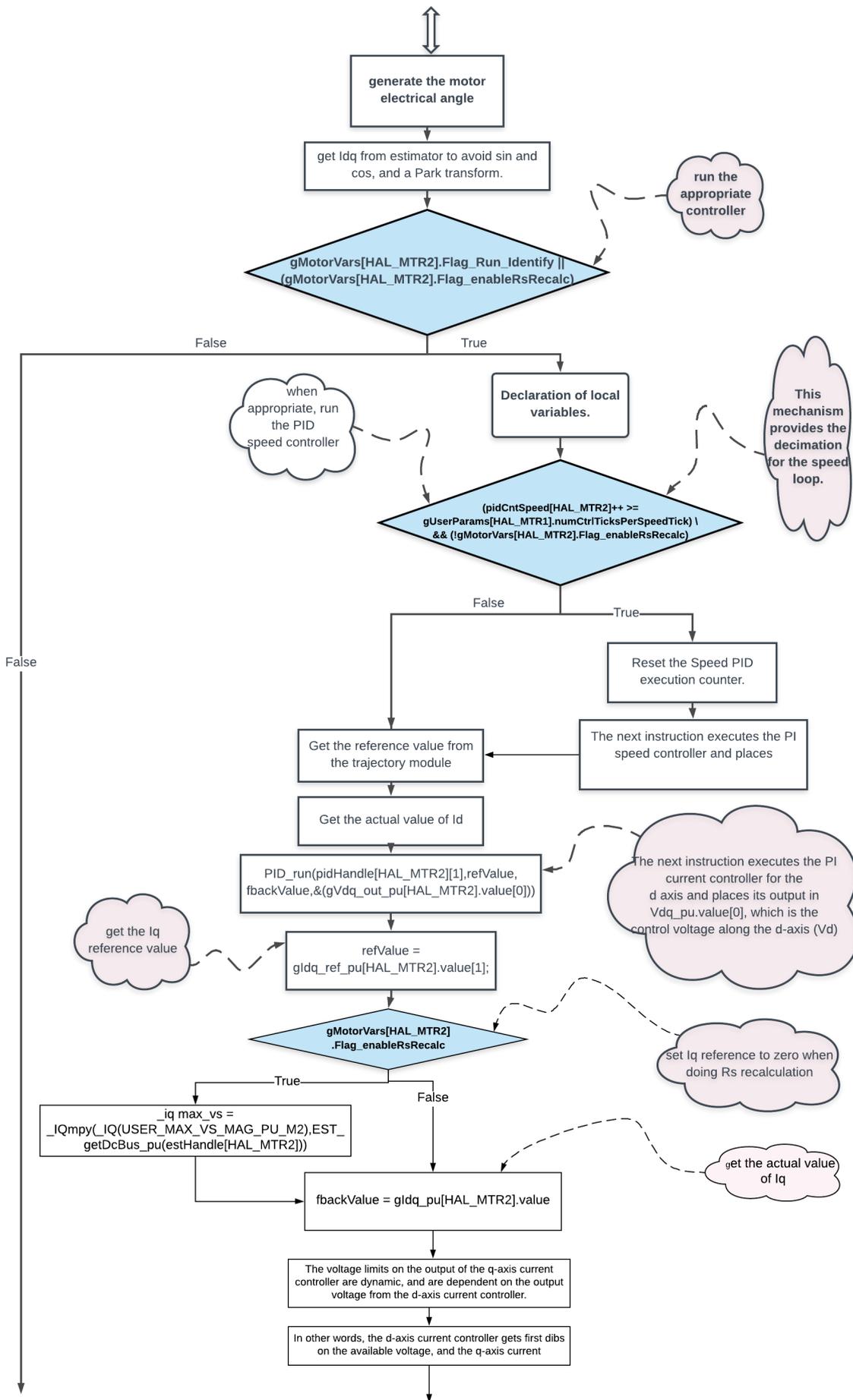


FIGURE 5.36 – Diagramme2 de la partie sans capteur (moteur2)

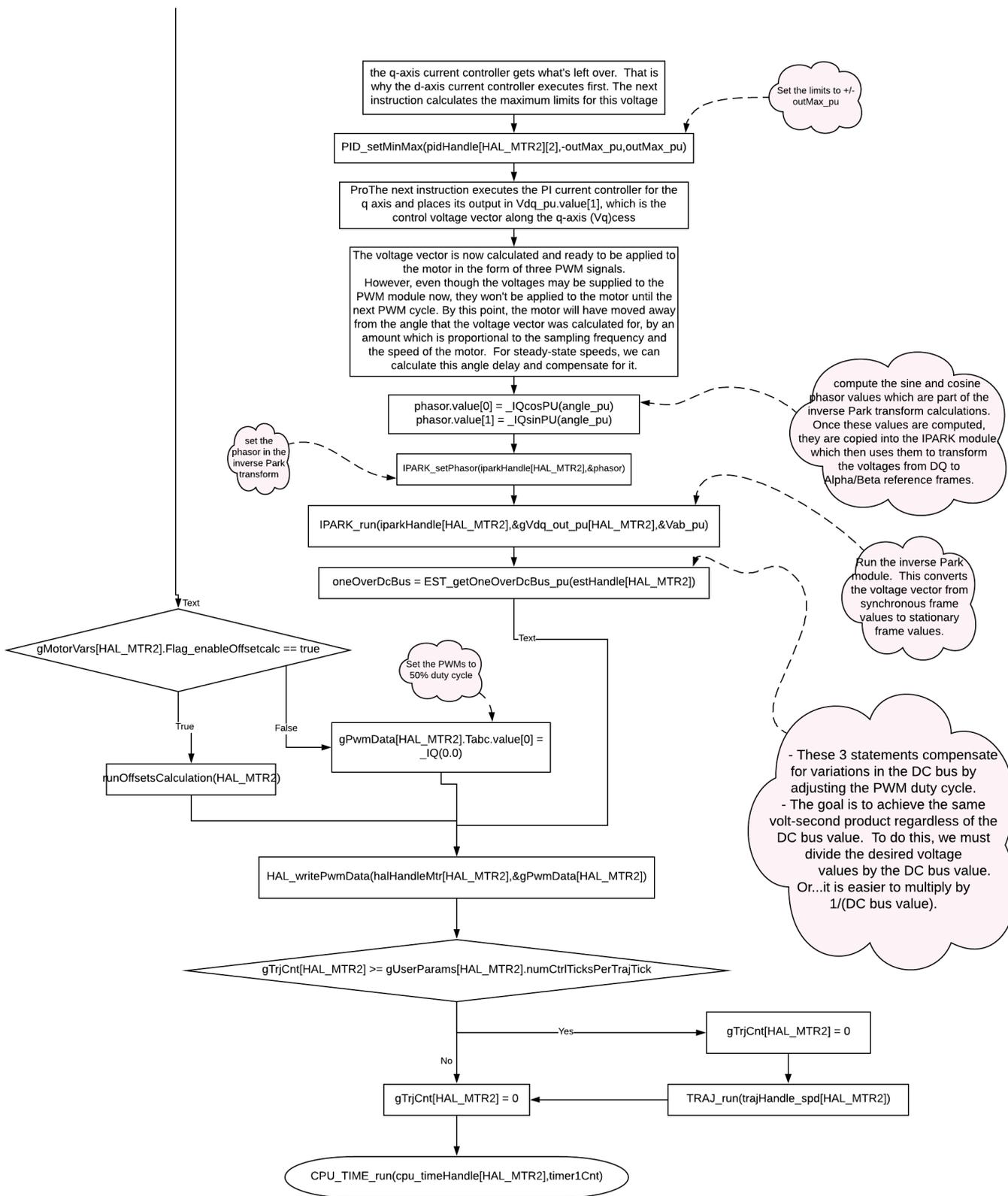


FIGURE 5.37 – Diagramme3 de la partie sans capteur (moteur2)

VI.4) Partie avec codeur incrémentale "moteur1, Sensored " :

Déclaration des variables locales :

```
1 interrupt void motor1_ISR(void)
2 {
3   _iq angle_pu = _IQ(0.0);
4   _iq speed_pu = _IQ(0.0);
5   _iq oneOverDcBus;
6   MATH_vec2 lab_pu;
7   MATH_vec2 Vab_pu;
8   MATH_vec2 phasor;
```

lire la valeur du timer 2 et met à jour le module d'utilisation de la CPU :

```
1 uint32_t timer1Cnt = HAL_readTimerCnt(halHandle,2);
2 CPU_TIME_updateCnts(cpu_timeHandle[HAL_MTR1],timer1Cnt);
```

activer "HAL_setGpioHigh"

Admettre l'interruption ADC, pour que on peut Convertir ADC data et faire Exécuter la transformation de Clarke sur le courant. Trois valeurs vert deux valeurs sont retournés.

```
1 HAL_setGpioHigh(halHandle,GPIO_Number_12);
2
3 HAL_acqAdcInt(halHandle,ADC_IntNumber_1);
4
5 HAL_readAdcDataWithOffsets(halHandle,halHandleMtr[HAL_MTR1],&gAdcData[HAL_MTR1])
6   ;
7 gAdcData[HAL_MTR1].I.value[0] = gAdcData[HAL_MTR1].I.value[0] - gOffsets_I_pu[
8   HAL_MTR1].value[0];
9 gAdcData[HAL_MTR1].I.value[1] = gAdcData[HAL_MTR1].I.value[1] - gOffsets_I_pu[
10  HAL_MTR1].value[1];
11 gAdcData[HAL_MTR1].I.value[2] = gAdcData[HAL_MTR1].I.value[2] - gOffsets_I_pu[
12  HAL_MTR1].value[2];
13
14 gAdcData[HAL_MTR1].V.value[0] = gAdcData[HAL_MTR1].V.value[0] - gOffsets_V_pu[
15  HAL_MTR1].value[0];
16 gAdcData[HAL_MTR1].V.value[1] = gAdcData[HAL_MTR1].V.value[1] - gOffsets_V_pu[
17  HAL_MTR1].value[1];
18 gAdcData[HAL_MTR1].V.value[2] = gAdcData[HAL_MTR1].V.value[2] - gOffsets_V_pu[
19  HAL_MTR1].value[2];
20
21 CLARKE_run(clarkeHandle_I[HAL_MTR1],&gAdcData[HAL_MTR1].I,&lab_pu);
```

récupère l'idq de l'estimateur pour éviter sin et cos, et une transformée de Park, qui économise les cycles du processeur.

Exécuter le module Park et faire calculer l'angle électrique. Ceci convertit le vecteur courant des valeurs stationnaires en valeurs synchrone.

calculer l'angle électrique

```

1 EST_getldq_pu( estHandle[HAL_MTR1], &gldq_pu[HAL_MTR1] );
2
3 PARK_run( parkHandle[HAL_MTR1], &lab_pu, &gldq_pu[HAL_MTR1] );
4
5 ENC_calcElecAngle( encHandle[HAL_MTR1], HAL_getQepPosnCounts( halHandleMtr[
    HAL_MTR1] ) );

```

Lire les données ADC ensuite dans les registres de résultats ADC et met à l'échelle les valeurs en fonction des paramètres définis dans user.h. La structure gAdcData contient des tensions triphasées, trois courants de ligne et une tension de bus à courant continu. Après on exécute le régulateur approprié. ensuite on vérifie si le moteur doit être forcé dans l'alignement du codeur. Si nécessaire, exécutez SpinTAC Velocity Control. Ce mécanisme fournit la décimation de la boucle de vitesse si c'est Just alors faire Réinitialiser le compteur d'exécution de vitesse. Qui vas transmettre la configuration à SpinTAC Velocity Move.

L'instruction `gldq_ref_pu[HAL_MTR1].value[1]` exécute SpinTAC Velocity Control et des lieux. Sa sortie dans `ldq_ref_pu.value[1]`, qui est la référence en entrée. Valeur pour le contrôleur de courant d'axe q.

```

1 if (gMotorVars[HAL_MTR1].Flag_Run_Identify || (gMotorVars[HAL_MTR1].
    Flag_enableRsRecalc))
2 {
3   _iq_refValue;
4   _iq_fbackValue;
5   _iq_outMax_pu;
6
7   if (gMotorVars[HAL_MTR1].Flag_enableAlignment == false)
8   {
9     if (stCntSpeed[HAL_MTR1] >= gUserParams[HAL_MTR1].numCtrlTicksPerSpeedTick)
10    {
11      stCntSpeed[HAL_MTR1] = 0;
12
13      STVELMOVE_setCurveType(st_obj[HAL_MTR1].velMoveHandle, gMotorVars[HAL_MTR1].
        SpinTAC.VelMoveCurveType);
14      STVELMOVE_setVelocityEnd(st_obj[HAL_MTR1].velMoveHandle, _IQmpy(gMotorVars[
        HAL_MTR1].SpeedRef_krpm, gSpeed_krpm_to_pu_sf[HAL_MTR1]));
15      STVELMOVE_setAccelerationLimit(st_obj[HAL_MTR1].velMoveHandle, _IQmpy(gMotorVars
        [HAL_MTR1].MaxAccel_krpmps, gSpeed_krpm_to_pu_sf[HAL_MTR1]));
16      STVELMOVE_setJerkLimit(st_obj[HAL_MTR1].velMoveHandle, _IQ20mpy(gMotorVars[
        HAL_MTR1].MaxJrk_krpmps2, _IQtoIQ20(gSpeed_krpm_to_pu_sf[HAL_MTR1]));
17
18      ST_runVelMove(stHandle[HAL_MTR1], NULL, (bool *)&gMotorVars[HAL_MTR1].
        Flag_enableForceAngle);
19
20      gldq_ref_pu[HAL_MTR1].value[1] = ST_runVelCtl(stHandle[HAL_MTR1],
        STPOS CONV_getVelocity(st_obj[HAL_MTR1].posConvHandle));
21    }

```

```

1 else
2 {

```

```

3 // increment counter
4 stCntSpeed [HAL_MTR1]++;
5 }

```

Générer l'angle électrique du moteur et mettre le à jour dans l'angle électrique du module SLIP. Ensuite faire régler l'angle magnétique.

Forcer l'angle moteur et la vitesse à 0 pour régler le courant de l'axe D sur le courant d'estimation Rs et définir le courant de l'axe Q sur 0.

si le compteur d'alignement dépasse le seuil, quittez l'alignement

```

1
2 if (gUserParams[HAL_MTR1].motor_type == MOTOR_Type_Induction)
3 {
4
5 SLIP_setElectricalAngle(slipHandle[HAL_MTR1], ENC_getElecAngle(encHandle[
6     HAL_MTR1]));
7
8 SLIP_run(slipHandle[HAL_MTR1]);
9
10 angle_pu = SLIP_getMagneticAngle(slipHandle[HAL_MTR1]);
11 }
12 else
13 {
14 angle_pu = ENC_getElecAngle(encHandle[HAL_MTR1]);
15 }
16 speed_pu = STPOSCONV_getVelocity(st_obj[HAL_MTR1].posConvHandle);
17 }
18 else
19 {
20 angle_pu = _IQ(0.0);
21 speed_pu = _IQ(0.0);
22
23 gldq_ref_pu[HAL_MTR1].value[0] = _IQ(USER_MOTOR_RES_EST_CURRENT/
24     USER_IQ_FULL_SCALE_CURRENT_A);
25
26 gldq_ref_pu[HAL_MTR1].value[1] = _IQ(0.0);
27
28 if (gUserParams[HAL_MTR1].motor_type == MOTOR_Type_Pm)
29 {
30 ENC_setZeroOffset(encHandle[HAL_MTR1], (uint32_t)(HAL_getQepPosnMaximum(
31     halHandleMtr[HAL_MTR1]) - HAL_getQepPosnCounts(halHandleMtr[HAL_MTR1])));
32 }
33 if (gAlignCount[HAL_MTR1]++ >= gUserParams[HAL_MTR1].ctrlWaitTime[
34     CTRL_State_OffLine])
35 {
36 gMotorVars[HAL_MTR1].Flag_enableAlignment = false;
37 gAlignCount[HAL_MTR1] = 0;
38 gldq_ref_pu[HAL_MTR1].value[0] = _IQ(0.0);
39 }
40 }

```

Obtenez la valeur de référence pour le contrôleur de courant d'axe d. la valeur réelle de I_d , pour faire exécuter le contrôleur de courant PI pour l'axe d et place sa sortie dans `Vdq_pu.value [0]`, qui correspond à la tension de commande sur l'axe d (V_d).

obtenir la valeur de référence I_q . Et la valeur réelle de I_q en suite faire Les limites de tension à la sortie du contrôleur de courant de l'axe q qui il sont dynamiques et dépendent de la tension de sortie du contrôleur de courant de l'axe d. En d'autres termes, le contrôleur de courant d'axe d obtient les premiers d'bs sur la tension disponible et le contrôleur de courant d'axe q récupère ce qui reste. C'est pourquoi le contrôleur de courant d'axe d s'exécute en premier. L'instruction suivante calcule les limites maximales pour cette tension comme suit : $V_{q_min_max} = \pm \sqrt{(V_{bus} \hat{=} - V_d \hat{=})}$.

L'instruction `PID_setMinMax` exécute le contrôleur de courant PI pour l'axe q et place sa sortie dans `Vdq_pu.value [1]`, qui est le vecteur de tension de commande sur l'axe q (V_q).

Le vecteur de tension est maintenant calculé et prêt à être appliqué au moteur sous la forme de trois signaux PWM. Cependant, même si les tensions peuvent être fournies au module PWM maintenant, elles ne seront pas appliquées au moteur avant le cycle PWM suivant. À ce stade, le moteur s'est éloigné de l'angle pour lequel le vecteur de tension a été calculé, d'une quantité proportionnelle à la fréquence d'échantillonnage et à la vitesse du moteur. Pour les vitesses stables, nous pouvons calculer ce retard angulaire et le compenser.

calcule les valeurs de phraséur sinus et cosinus qui font partie des calculs de transformée de Park inverse. Une fois ces valeurs calculées, elles sont copiées dans le module `IPARK`, qui les utilise ensuite pour transformer les tensions de cadres de référence d q en cadres de référence Alpha / Beta.

définir le phraséur dans la transformation inverse de Park, en suite faire Exécutez le module de parcage inverse. Ceci convertit le vecteur de tension des valeurs de trame synchrones en valeurs de trame stationnaires.

Les 3 instructions PWM compensent les variations du bus cc en ajustant le rapport cyclique PWM. L'objectif est d'obtenir le même produit volt-seconde quelle que soit la valeur du bus CC. Pour ce faire, il faut diviser les valeurs de tension souhaitées par la valeur du bus continu. Ou ... il est plus facile de multiplier par $1 / (\text{valeur du bus CC})$.

```
1 refValue = gldq_ref_pu[HAL_MTR1].value[0];
2
3 fbackValue = gldq_pu[HAL_MTR1].value[0];
4
5 PID_run(pidHandle[HAL_MTR1][1], refValue, fbackValue, &(gVdq_out_pu[HAL_MTR1].value
  [0]));
6
7 refValue = gldq_ref_pu[HAL_MTR1].value[1];
8
9 fbackValue = gldq_pu[HAL_MTR1].value[1];
10
11 outMax_pu = _IQsqrt(_IQ(USER_MAX_VS_MAG_PU * USER_MAX_VS_MAG_PU)
12 - _IQmpy(gVdq_out_pu[HAL_MTR1].value[0], gVdq_out_pu[HAL_MTR1].value[0]));
13
14 PID_setMinMax(pidHandle[HAL_MTR1][2], -outMax_pu, outMax_pu);
15
```

```

16 PID_run(pidHandle[HAL_MTR1][2], refValue, fbackValue, &(gVdq_out_pu[HAL_MTR1].value
    [1]));
17
18 ANGLE_COMP_run(angleCompHandle[HAL_MTR1], speed_pu, angle_pu);
19 angle_pu = ANGLE_COMP_getAngleComp_pu(angleCompHandle[HAL_MTR1]);
20
21 phasor.value[0] = _IQcosPU(angle_pu);
22 phasor.value[1] = _IQsinPU(angle_pu);
23
24 IPARK_setPhasor(iparkHandle[HAL_MTR1], &phasor);
25
26 IPARK_run(iparkHandle[HAL_MTR1], &gVdq_out_pu[HAL_MTR1], &Vab_pu);

```

Sur l'utilisation d'un IQdiv Over Dc Bus.

Exécutez maintenant le module générateur de vecteurs d'espace (SVGEN). Il n'est pas nécessaire de faire une transformation CLARKE inverse, car celle-ci est gérée dans la fonction SVGEN_run.

Réglez les PWM sur 50 % cycle de service

écrivez aux registres de comparaisons PWM, et nous aurons fini ! Pour faire exécuter une trajectoire pour la référence de vitesse, de sorte que la référence change avec une rampe au lieu d'un pas, puis lire la valeur du timer 2 et met à jour le module d'utilisation de la CPU

```

1 oneOverDcBus = _IQdiv(_IQ(1.0), gAdcData[HAL_MTR1].dcBus);
2
3 Vab_pu.value[0] = _IQmpy(Vab_pu.value[0], oneOverDcBus);
4 Vab_pu.value[1] = _IQmpy(Vab_pu.value[1], oneOverDcBus);
5
6 SVGEN_run(svgenHandle[HAL_MTR1], &Vab_pu, &(gPwmData[HAL_MTR1].Tabc));
7
8 }
9 else if(gMotorVars[HAL_MTR1].Flag_enableOffsetcalc == true)
10 {
11 runOffsetsCalculation(HAL_MTR1);
12 }
13 else // gMotorVars.Flag_Run_Identify = 0
14 {
15 HAL_disablePwm(halHandleMtr[HAL_MTR1]);
16
17 gPwmData[HAL_MTR1].Tabc.value[0] = _IQ(0.0);
18 gPwmData[HAL_MTR1].Tabc.value[1] = _IQ(0.0);
19 gPwmData[HAL_MTR1].Tabc.value[2] = _IQ(0.0);
20 }
21
22 HAL_writePwmData(halHandleMtr[HAL_MTR1], &gPwmData[HAL_MTR1]);
23
24 HAL_setGpioLow(halHandle, GPIO_Number_12);
25
26 if(gTrjCnt[HAL_MTR1] >= gUserParams[HAL_MTR1].numCtrlTicksPerTrajTick)
27 {
28 // clear counter

```

```
29 gTrjCnt[HAL_MTR1] = 0;
30
31 TRAJ_run(trajHandle_spd[HAL_MTR1]);
32 }
33 timer1Cnt = HAL_readTimerCnt(halHandle,2);
34 CPU_TIME_run(cpu_timeHandle[HAL_MTR1],timer1Cnt);
35
36 return;
37 } // end of motor1_ISR() function
```

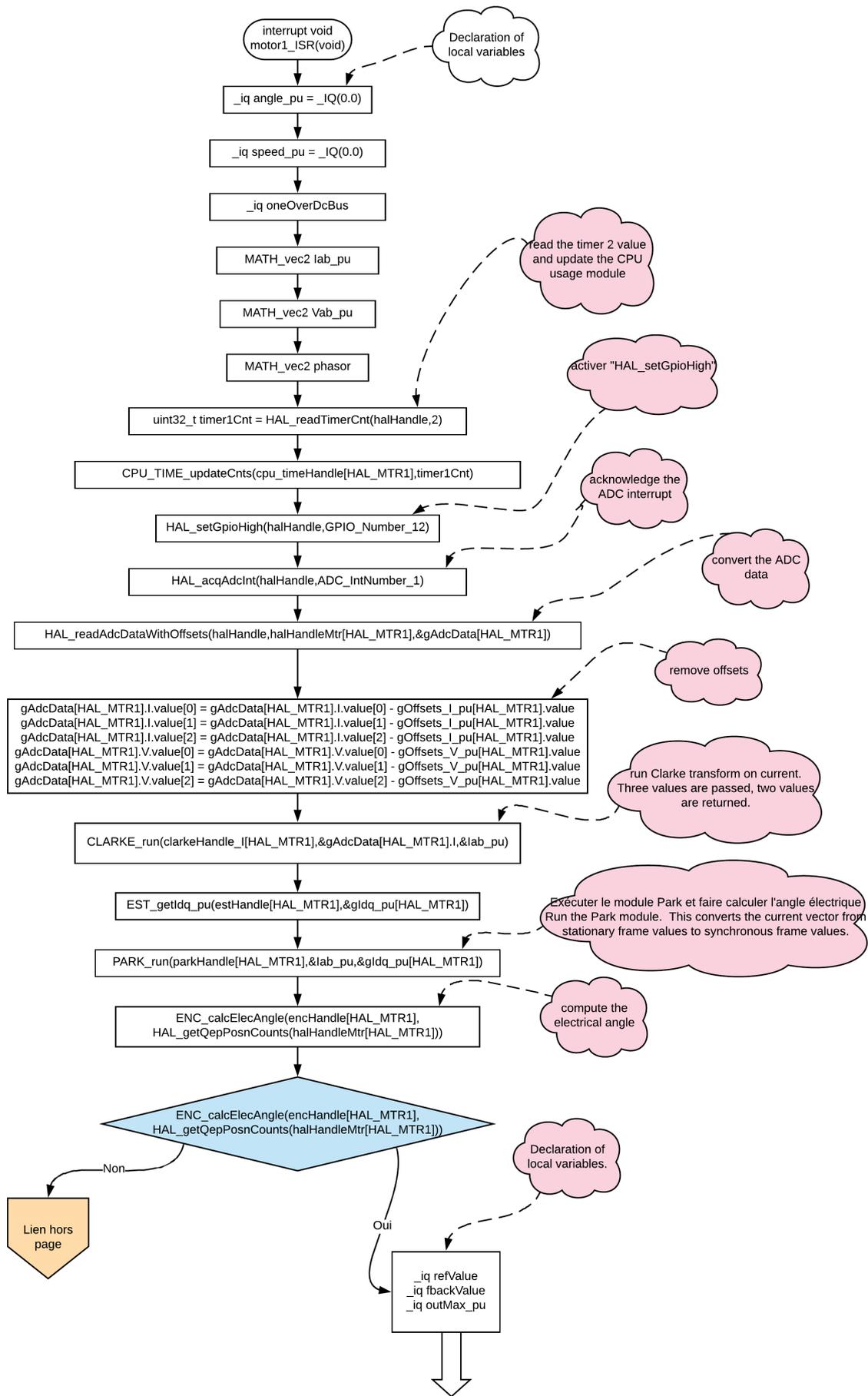


FIGURE 5.38 – Diagramme1 de la partie avec capteur (moteur1)

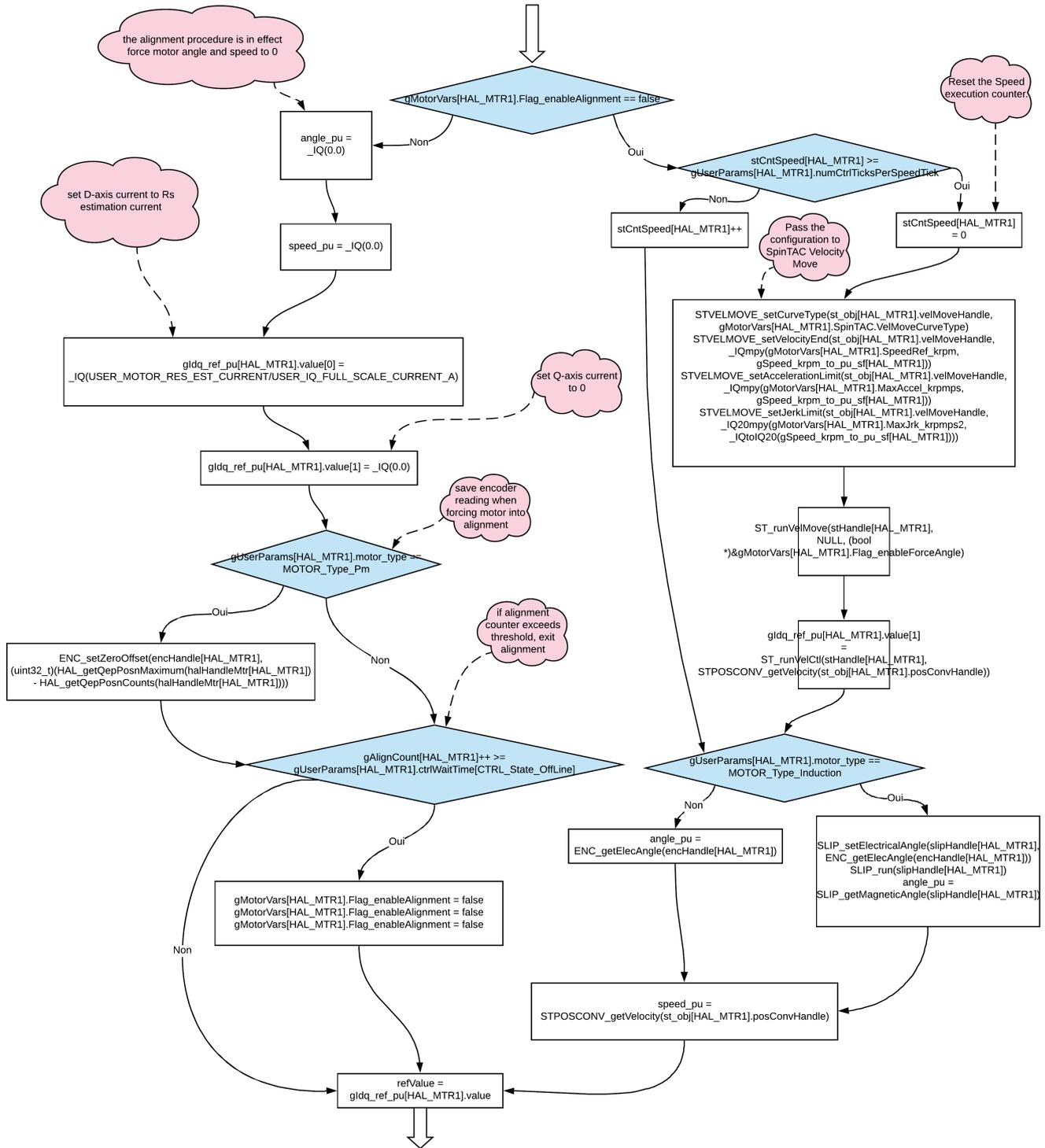


FIGURE 5.39 – Diagramme2 de la partie avec capteur (moteur1)

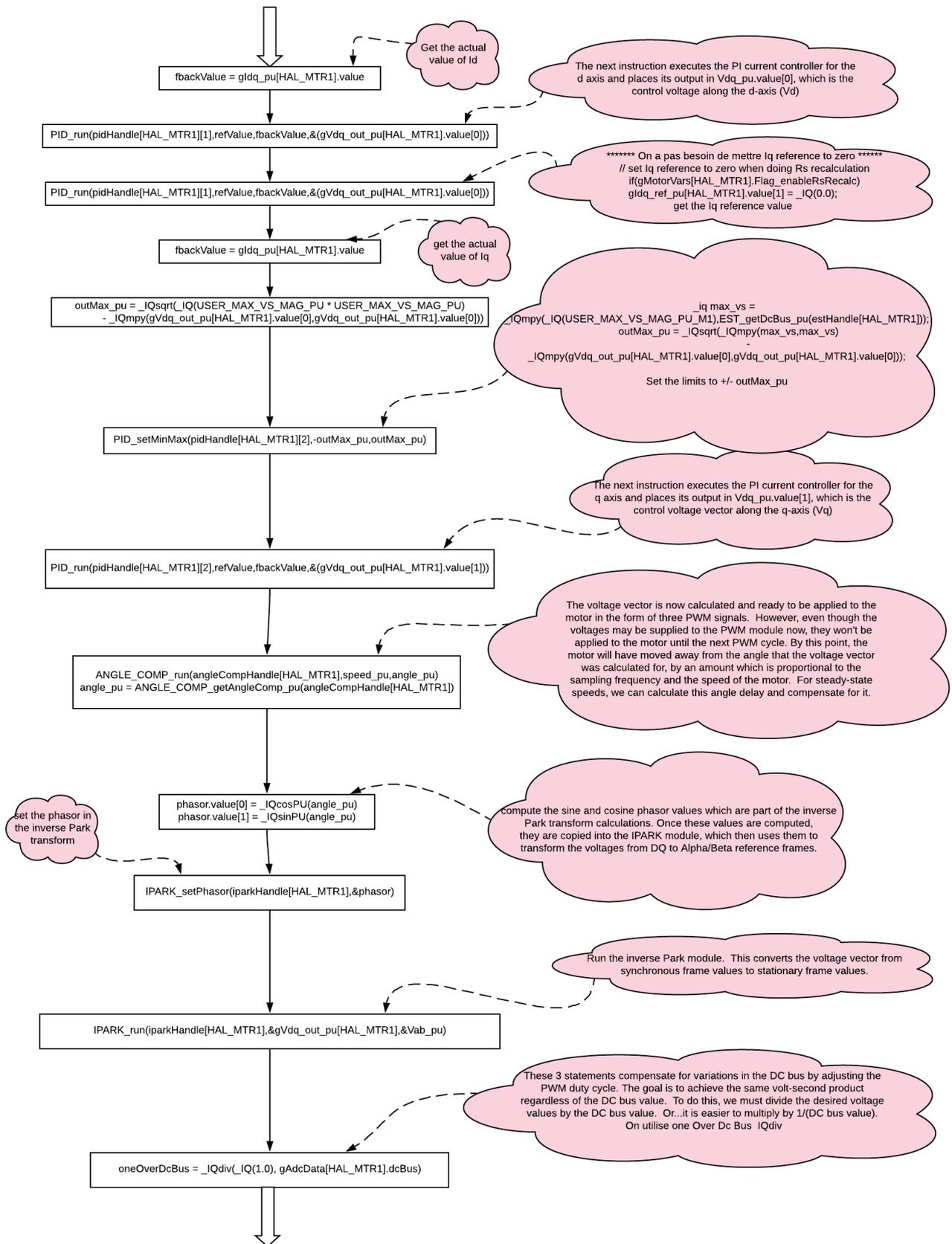


FIGURE 5.40 – Diagramme3 de la partie avec capeur (moteur1)

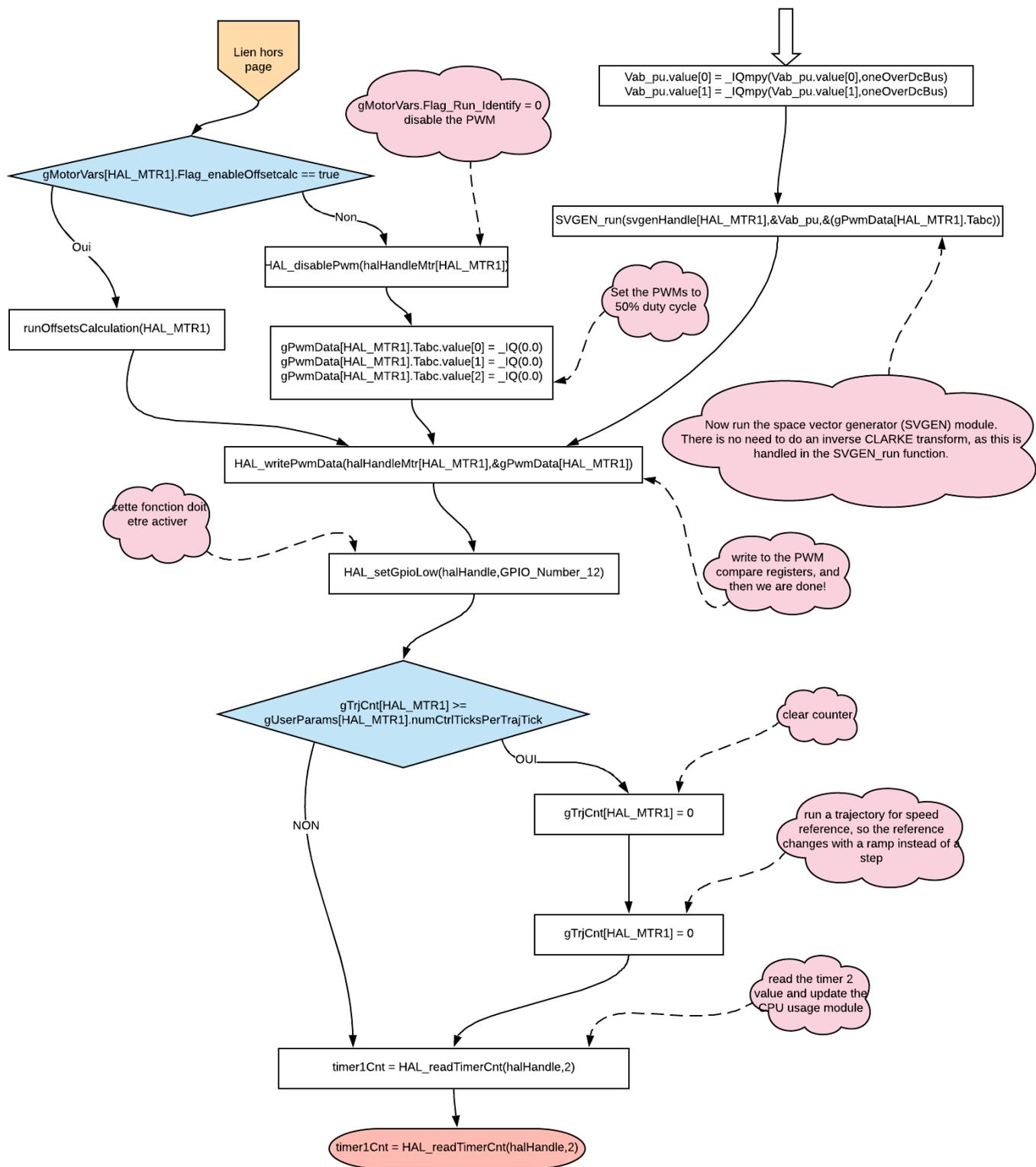


FIGURE 5.41 – Diagramme4 de la partie avec capteur (moteur1)

VII) Conclusion

Notre projet comporte la construction d'un véhicule électrique, et de la commande de ses 2 moteurs. Nous avons tenté une commande avec capteur mécanique (codeur incrémental) pour le moteur1 et une commande sans capteur mécanique pour le moteur 2. Ces moteurs sont de type BLDC et ont un fort couple et de fort courant. Les 2 moteurs entraînent chacun de son cotée une roue motrice via un réducteur de vitesse. Les 2 moteurs sont alimentés par deux onduleurs triphasée branchée et pilotée par la carte LaunchPad XL 28069M. Cette dernière se programme par l'IOT code composer studios (v9) et de la bibliothèque de MotorWare 1.04.

Nous pouvons dire que la conception et l'optimisation de la chaîne de traction d'un véhicule électrique est un problème pluridisciplinaire qui doit prendre en considération, au minimum, les batteries, la transmission mécanique et la motorisation électromagnétique à alimentation électronique. Enfin, la recherche d'un coût minimal vient s'ajouter aux difficultés scientifiques et technologiques.

Pour les futures plates-formes elles doivent répondre à de nouvelles spécifications de mobilité, limitant considérablement leur poids et leurs dimensions afin de rendre le véhicule plus modulaire, ces spécificités en modularité, compacité et flexibilité passent par une remise en cause profonde de l'architecture du véhicule.

Conclusion générale et perspective

Le travail présenté dans ce projet de fin d'étude est une réalisation de la motorisation d'un véhicule électrique propulsé par deux roues motrices commandées indépendamment en deux stratégies de commande.

Ce projet nous a permis d'aborder plusieurs disciplines en même temps : mécanique, électrotechnique, électronique de puissance, commande de machines. et qui nous présentent une excellente expérience, enrichissante, qui m'a permis d'acquérir des notions poussées sur un sujet, que nous avons découvert et vraiment apprécié.

Grâce à ces recherches présentées dans ce projet, le kart électrique réalisé reste un petit pas vers l'intégration dans les parcs de véhicules urbains où il correspond de plus en plus aux besoins des utilisateurs et aux évolutions de la technologie.

En perspective de notre travail nous proposons de :

Revoir le support arrière et le placer sur l'axe des roues pour ne pas faire supporter le poids total sur l'arbre des moteurs

Revoir l'accouplement des moteurs, il faut le changer soit vous mettez d'autre type d'accouplement ou bien fabriquer le chez le tourneur comme le premier accouplement.

Il vous reste :

- ❶ Ajouté 2 pédales potentiométrique et la relier aux entrées du DSC.
- ❷ Le 2eme pédale permet d'appliquer un couple négatif mais si elle est complètement enforcée, elle doit additionner un frein mécanique (à disque, comme celui d'un vélo) pour des raisons de sécurité.
- ❸ Ajouter un module RF pour pouvoir piloter le véhicule électrique à distance à l'aide d'une télécommande en PPM

Bibliographie

- [1] Texas Instruments Incorporated. Launchxl-f28069m quickstartguide sprui11a.pdf. August 2018.
- [2] Texas Instruments Incorporated. slvscx2b.pdf / drv8305 three phase gate driver with current shunt amplifiers and voltage regulator. FEBRUARY 2016.
- [3] Hardware abstraction layer (hal) module of motorware.
- [4] Instaspin projects and labs user's guide, February 2013. [Texas Instruments].
- [5] Abdeljalil Daanoune. *Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides*. PhD thesis, Université de Grenoble, 2012.
- [6] M. Guarnieri. electric cars. In *Proc. IEEE Conf. on The Origins of Electrotechnologies*, 2012.
- [7] Lidia Todorova. Some Facts about Electric Vehicles. <https://www.automobilesreview.com/auto-news/some-facts-about-electric-vehicles/42240/>, 2012. [Online; accessed 25 February 2012].
- [8] Frank Watson. "global electric vehicle sales set new record". 2019.
- [9] D.Benoudjit. *Contribution a l'optimisation et a la commande D'un système de propulsion Pour véhicule électrique*. PhD thesis, Es-Science Université de Batna, 2010.
- [10] Michel Kant. La voiture électrique. *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, 12(D5560) :D5560–1, 1995.
- [11] Toufik Rekioua. *Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1991.
- [12] M PORNIN. Traction électrique automobile routière, 1981.
- [13] Jamel Belhadj. *Commande directe en couple d'une machine asynchrone : structures d'observations : application aux systèmes multimachines-multiconvertisseurs*. PhD thesis, Toulouse, INPT, 2001.
- [14] Rochdi Trigui. *Motorisation asynchrone pour véhicules électriques : modélisation, optimisation et évaluation*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1997.
- [15] Ned Mohan. Dsp based electric drives laboratory–user manual. *Department of Electrical and Computer Engineering, University of Minnesota*, 2007.
- [16] Lotfi Baghli. *Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, 1999.

- [17] Lotfi Baghli. *Commande de la machine synchrone et de la machine à réluctance variable*, 2015.
- [18] Marwa Ezzat. *Commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone à aimants permanents*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2011.
- [19] A Moussi, A Titaouine, F Benchabane, and K Yahia. *Commande d'une machine synchrone a aimants permanents et estimation de ces paramètres en utilisant le filtre de kalman etendu*. 2008.
- [20] Abder Rezak Benaskeur and Andre Desbiens. Backstepping-based adaptive pid control. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 149(1) :54–59, 2002.
- [21] Sébastien Carrière. *Synthèse croisée de régulateurs et d'observateurs pour le contrôle robuste de la machine synchrone*. PhD thesis, 2010.
- [22] MS Merzoug. *Etude comparative des performances d'un dtc et d'un foc d'une machine synchrone à aimants permanents (msap)*. *Mémoire Magister Université de Batna*, 2008.
- [23] Salah Eddine Rezgui. *Commande de machine électrique en environnement matlab/simulink et temps réel, application à la machine asynchrone : Commande vectorielle sans capteurs mécaniques svpwm, mode glissant, mras*. *Mémoire de Magister de l'université Mentouri de Costantine*, 2009.
- [24] Ioannis Kanellakopoulos, Petar V Kokotovic, and A Stephen Morse. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems. In *1991 American Control Conference*, pages 649–654. IEEE, 1991.
- [25] Guy Séguier, Christian Rombaut, and Robert Bausiere. *Les convertisseurs de l'électronique de puissance*. Technique et Documentation, 1986.
- [26] Song Chi. *Position-sensorless control of permanent magnet synchronous machines over wide speed range*. PhD thesis, The Ohio State University, 2007.
- [27] Zedong Zheng. *Commande à haute performance et sans capteur mécanique du moteur synchrone à aimants permanents*. PhD thesis, 2008.
- [28] Florent Morel. *Commandes directes appliquées à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un onduleur triphasé à deux niveaux ou par un convertisseur matriciel triphasé*. PhD thesis, Ph. D. dissertation, INSA de Lyon, 2007,(in french), 2007.
- [29] Arnaud Sivert, F Betin, and Thierry Lequeu. Réalisation d'un kart électrique performant : gestion de l'énergie embarquée et choix technologiques. *J3eA*, 14 :1008, 2015.
- [30] Texas Instruments Incorporated. *Read me first instaspin-foc and instaspin-motion launchpad and boosterpack.pdf*. August, 2015.
- [31] Texas Instruments Incorporated. *Motorware software architecture*. February 2013.
- [32] Motorcontrol software (sdk) for c2000™ mcus. <http://www.ti.com/tool/c2000ware-motorcontrol-sdk#technicaldocuments>, 20 Mar 2019. [Online; accessed 20 Mar 2019].